



TESIS-TE142599

OPTIMISASI NILAI KAPASITOR PADA *SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR* (SEIG) TIGA FASA UNTUK MENYUPLAI BEBAN SATU FASA MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

NITA INDRIANI PERTIWI
2213 201 021

DOSEN PEMBIMBING
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



TESIS-TE142599

**OPTIMIZATION OF EXCITATION CAPACITOR
VALUES OF A THREE PHASE SELF EXCITED
INDUCTION GENERATOR (SEIG) TO SUPPLY SINGLE
PHASE LOAD USING PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION METHOD**

NITA INDRIANI PERTIWI
2213 201 021

SUPERVISOR
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

MAGISTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

Telah disusun untuk salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
NITA INDRIANI PERTIWI
NRP. 2213201021

Tanggal Ujian : 17 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui Oleh :

02/07/15

1. Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001

(Pembimbing I)

2. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198006032006041003

(Pembimbing II)

3. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT
NIP. 195512071980031004

(Penguji)

4. Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.
NIP. 196603181990101001

(Penguji)

5. Dr.Eng.I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc.
NIP.197007121998021001

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana

Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404031990021001



OPTIMISASI NILAI KAPASITOR EKSITASI PADA *SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR* (SEIG) TIGA FASA UNTUK MENYUPLAI BEBAN SATU FASA MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

Nama : Nita Indriani Pertiwi
NRP : 2213 201 021
Dosen Pembimbing : 1. Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
2. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Self Excited Induction Generator (SEIG) merupakan salah satu jenis generator induksi yang cocok digunakan pada wilayah terpencil. Penggunaan SEIG pada wilayah terpencil didasari karena SEIG mampu menghasilkan eksitasi secara mandiri tanpa harus terhubung dengan *grid*. Pengoperasian SEIG akan disesuaikan dengan kondisi pembebanan pada wilayah terpencil yang umumnya adalah beban satu fasa. SEIG tiga fasa dapat digunakan untuk menyuplai beban satu fasa dengan memanfaatkan salah satu belitan mesin. Namun, hal ini akan menyebabkan penurunan daya keluaran dimana hanya satu per tiga dari daya rating yang dapat dimanfaatkan. Permasalahan ini dapat diatasi dengan melakukan pemodelan SEIG tiga fasa untuk beban satu fasa. Dalam pemodelan SEIG untuk beban satu fasa, kapasitor merupakan komponen yang sangat penting. Pada penelitian ini, nilai kapasitor akan dioptimisasi menggunakan sebuah metode *Artificial Intelligent* yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO). Optimisasi kapasitor dengan PSO bertujuan untuk mendapatkan nilai kapasitor yang optimal sehingga diperoleh daya output maksimum dari SEIG untuk beban satu fasa. Hasil optimisasi kapasitor telah diuji melalui simulasi dan eksperimen menggunakan mesin induksi 3 fasa 0,75 kW, 380 V, 3,6 A, 50 Hz, 4 kutub yang bekerja sebagai SEIG. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan kinerja SEIG hingga 44,35% dari rating mesin.

Kata kunci : *Self Excited Induction Generator* (SEIG), Motor Induksi, Kapasitor, *Particle Swarm Optimization*.

--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

OPTIMIZATION OF EXCITATION CAPACITOR VALUES OF A THREE PHASE SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR (SEIG) TO SUPPLY SINGLE PHASE LOAD USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD

By : Nita Indriani Pertiwi
Student Identity : 2213 201 021
Supervisor : 1. Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
2. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Self excited induction generator (SEIG) is one type of induction generator that suitable in remote locations. SEIG suitable in remote locations due to its advantages, that is able to produce excitation independently without having to connect to the grid. SEIG operation will be adapted to the load condition in remote locations which are commonly single phase load. Three phase SEIG can be use to supplied single phase load by utilizing one of the winding machine. However, this lead to decreasing of output power that is only one-third of rated power. This problem can be solved by modelling three phase SEIG to supplied single phase load where excitation capacitor is essential component. Therefore, in this research an artificial intelligent method that is Particle Swarm optimization (PSO) used to obtained the optimal values of excitation capacitor. With optimal capacitor, the maximum output power of SEIG to supplied single phase load is obtained. Optimal capacitor obtained by PSO is verified through simulation and experimental on a 0,75 kW, 380 V, 3,6 A, 50 Hz, four-pole three phase induction machine working as SEIG. Simulation and experimental results shows that the proposed method can increasing the performance of SEIG up to 44,35% of rated machine .

Keyword : Capacitor, Induction Machine, Self Excited Induction Generator (SEIG), Particle Swarm Optimization.

--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “OPTIMISASI NILAI KAPASITOR EKSITASI PADA *SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR* (SEIG) TIGA FASA UNTUK MENYUPLAI BEBAN SATU FASA MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)”

Adapun tujuan dari penyusunan Tesis ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar master teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan Tesis ini, yaitu :

1. Bapak yang telah berada disisi Allah SWT, Ibu yang hebat, kakak tercinta dan seluruh keluarga yang telah memberikan doa dan dukungan untuk menyelesaikan Tesis ini.
2. Bapak Dedet C. Riawan, ST., M. Eng., Ph.D dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., M. T., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran, ilmu serta bimbingan selama pengerjaan Tesis.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. selaku dosen wali penulis selama S2 serta seluruh dosen Teknik Elektro ITS atas ilmu yang telah diberikan.
4. Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (DIKTI) yang telah memberikan beasiswa *fresh graduate* kepada penulis.
5. Andikta Dwi Hirlanda yang selalu memberikan motivasi dan dukungan tiada henti kepada penulis. Terima kasih karena selalu menemani penulis disaat suka dan duka.
6. Mba Ribka, Mba Rini, Ratih dan Lobbita yang selalu menemani dan menguatkan penulis disaat senang dan susah. Terima kasih atas kebersamaan yang telah diberikan.
7. Mas Irwan atas sharing ilmu aplikatif dan bantuan selama pengerjaan tesis terutama saat eksperimen. Mas Daniar, Mas Febby, Eca, Mas Yanuar, Ibu Nur, Farid, Mba Maya dan seluruh rekan S2 Teknik Elektro ITS yang tidak mungkin penulis sebut satu per satu. Terima kasih atas sharing ilmu serta semangat yang telah diberikan.

8. Mr. Tadashi Fukami, penulis journal referensi yang selalu dengan rendah hati menjawab pertanyaan-pertanyaan yang penulis ajukan.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|---------|
| HALAMAN JUDUL | |
| HALAMAN PENGESAHAN | |
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR..... | v |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| DAFTAR TABEL | xv |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.4 Batasan Masalah | 2 |
| 1.5 Kontribusi Penelitian | 3 |
| BAB II <i>SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR (SEIG)</i> | |
| 2.1. <i>Self Excited Induction Generator (SEIG)</i> | 5 |
| 2.1.1 Prinsip Kerja..... | 5 |
| 2.1.2 Rangkaian Ekuivalen | 7 |
| 2.2 Penentuan Parameter pada Mesin Induksi..... | 7 |
| 2.2.1. Kurva Sautrasi Magnetik | 8 |
| 2.3 <i>Self Excited Induction Generator</i> Tiga Fasa..... | 10 |
| 2.3.1 Metode Admitansi | 10 |
| 2.3.2 Performa SEIG Tiga Fasa | 12 |

BAB III SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR UNTUK BEBAN SATU FASA

| | |
|--|----|
| 3.1. Pemodelan <i>Steady State</i> SEIG Tiga Fasa untuk Beban Satu fasa..... | 15 |
| 3.1.1. Rangkaian Ekvivalen SEIG untuk Beban Satu Fasa | 15 |
| 3.1.2. Metode Impedansi | 19 |
| 3.1.3. Konversi Parameter SEIG dalam Satuan per Unit..... | 20 |
| 3.2. Penentuan Nilai Frekuensi dan Magnetisasi..... | 21 |
| 3.3. Identifikasi Tegangan Terbangkit..... | 22 |
| 3.4. Optimisasi Nilai Kapasitor Eksitasi dengan PSO..... | 23 |
| 3.4.1 <i>Objective Function</i> dan <i>Constraint</i> | 24 |
| 3.4.2 Algoritma PSO | 24 |
| 3.4.3 Batas Maksimum dan Minimum Kapasitor | 25 |
| 3.5 Perhitungan Performa SEIG untuk Beban Satu Fasa | 27 |

BAB IV ANALISIS SIMULASI DAN HASIL EKSPERIMEN

| | |
|--|----|
| 4.1 Performa SEIG Sebelum Optimisasi C_s dan C_p | 32 |
| 4.1.1 Kondisi Tegangan Fasa pada Belitan Stator Sebelum Optimisasi | 32 |
| 4.1.2 Kondisi Arus Fasa pada Belitan Stator Sebelum Optimisasi | 36 |
| 4.1.3 Kondisi Tegangan Output Sebelum Optimisasi..... | 38 |
| 4.1.4 Kondisi Frekuensi Output Sebelum Optimisasi..... | 39 |
| 4.1.5 Efisiensi pada SEIG untuk Beban Satu Fasa Sebelum Optimisasi | 41 |
| 4.2 Performa SEIG Setelah Optimisasi C_s dan C_p | 42 |
| 4.2.1 Kondisi Tegangan Fasa pada Belitan Stator Setelah Optimisasi..... | 42 |
| 4.2.2 Kondisi Arus Fasa pada Belitan Stator Setelah Optimisasi | 50 |
| 4.2.3 Kondisi Tegangan Output Setelah Optimisasi | 56 |
| 4.2.4 Kondisi Frekuensi Output Setelah Optimisasi | 58 |
| 4.2.5 Efisiensi pada SEIG untuk Beban Satu Fasa Setelah Optimisasi..... | 59 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.6 | <i>Voltage Collapse</i> pada SEIG untuk Beban Satu Fasa | 61 |
|-------|---|----|

BAB V PENUTUP

| | | |
|------|-----------------|----|
| 5.1. | Kesimpulan..... | 63 |
| 5.2. | Saran | 64 |

| | |
|-----------------------------|----|
| DAFTAR PUSTAKA | 65 |
|-----------------------------|----|

BIOGRAFI PENULIS

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------------|---|----|
| Tabel 2.1 | Rating Mesin Induksi..... | 8 |
| Tabel 2.2 | Parameter Mesin Induksi | 8 |
| Tabel 3.1 | Parameter SEIG dalam Satuan Per Unit | 21 |
| Tabel 4.1 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_a Sebelum Optimisasi | 33 |
| Tabel 4.2 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_b Sebelum Optimisasi | 34 |
| Tabel 4.3 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_c Sebelum Optimisasi | 35 |
| Tabel 4.4 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_a Sebelum Optimisasi | 37 |
| Tabel 4.5 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_b Sebelum Optimisasi | 37 |
| Tabel 4.6 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_c Sebelum Optimisasi | 38 |
| Tabel 4.7 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_L Sebelum Optimisasi | 39 |
| Tabel 4.8 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen F Sebelum Optimisasi | 40 |
| Tabel 4.9 | Efisiensi SEIG untuk Beban Satu Fasa Sebelum Optimisasi | 41 |
| Tabel 4.10 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_a Setelah Optimisasi | 43 |
| Tabel 4.11 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_b Setelah Optimisasi | 44 |
| Tabel 4.12 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_c Setelah Optimisasi | 45 |
| Tabel 4.13 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_a Setelah Optimisasi | 50 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabel 4.14 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_b Setelah Optimisasi..... | 51 |
| Tabel 4.15 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_c Setelah Optimisasi..... | 51 |
| Tabel 4.16 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_L Setelah Optimisasi..... | 56 |
| Tabel 4.17 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen F Setelah Optimisasi..... | 59 |
| Tabel 4.18 | Efisiensi SEIG untuk Beban Satu Fasa Setelah Optimisasi..... | 60 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Skema SEIG Tiga Fasa | 5 |
| Gambar 2.2 | Karakteristik <i>Steady State</i> SEIG | 6 |
| Gambar 2.3 | Kurva Karakteristik Magnetisasi..... | 6 |
| Gambar 2.4 | Rangkaian Ekuivalen SEIG Tiga Fasa..... | 7 |
| Gambar 2.5 | Kurva Saturasi Magnetik Mesin Induksi..... | 9 |
| Gambar 2.6 | Pemodelan Admitansi SEIG | 10 |
| Gambar 2.7 | Grafik Resistansi Beban Terhadap Daya Output | 12 |
| Gambar 2.8 | Grafik Tegangan Terminal dan Daya Output Terhadap Perubahan Kecepatan..... | 13 |
| Gambar 2.9 | Grafik Arus Stator dan Daya Output Terhadap Perubahan Kecepatan..... | 14 |
| Gambar 3.1 | Skema SEIG Tiga Fasa untuk Beban Satu Fasa..... | 15 |
| Gambar 3.2 | Rangkaian Ekuivalen SEIG..... | 16 |
| Gambar 3.3 | Rangkaian Ekuivalen <i>Steady State</i> SEIG Untuk Beban Satu Fasa | 18 |
| Gambar 3.4 | Kurva Tegangan Terbangkit (E_g) Terhadap Reaktansi Magnetisasi (X_m)..... | 23 |
| Gambar 3.5 | Kurva Variasi X_m terhadap C | 26 |
| Gambar 3.6 | Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen SEIG | 27 |
| Gambar 3.7 | Aliran Daya pada <i>Self Excited Induction Generator</i> (SEIG) | 29 |
| Gambar 4.1 | Skema Eksperimen SEIG untuk Beban Satu Fasa | 31 |
| Gambar 4.2 | Eksperimen SEIG untuk Beban Satu Fasa..... | 31 |
| Gambar 4.3 | Variasi V_a Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi | 33 |
| Gambar 4.4 | Variasi V_b Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi..... | 34 |
| Gambar 4.5 | Variasi V_c Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi | 35 |
| Gambar 4.6 | Variasi Arus Fasa Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi | 36 |
| Gambar 4.7 | Variasi Tegangan Output terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi | 38 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 4.8 | Variasi Frekuensi Output terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi..... | 40 |
| Gambar 4.9 | Efisiensi pada SEIG dengan Perubahan Beban Sebelum Optimisasi..... | 41 |
| Gambar 4.10 | Variasi V_a Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi..... | 43 |
| Gambar 4.11 | Variasi V_b Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi..... | 44 |
| Gambar 4.12 | Variasi V_c Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi..... | 45 |
| Gambar 4.13 | Gelombang Tegangan Fasa Stator saat Tanpa Beban | 46 |
| Gambar 4.14 | Harmonisa Tegangan Fasa a pada Kondisi Tanpa Beban | 46 |
| Gambar 4.15 | Harmonisa Tegangan Fasa b pada Kondisi Tanpa Beban | 47 |
| Gambar 4.16 | Harmonisa Tegangan Fasa c pada Kondisi Tanpa Beban | 47 |
| Gambar 4.17 | Gelombang Tegangan Fasa Stator saat Beban Maksimum | 48 |
| Gambar 4.18 | Harmonisa Tegangan Fasa a pada Kondisi Beban Maksimum... | 48 |
| Gambar 4.19 | Harmonisa Tegangan Fasa b pada Kondisi Beban Maksimum... | 49 |
| Gambar 4.20 | Harmonisa Tegangan Fasa c pada Kondisi Beban Maksimum... | 49 |
| Gambar 4.21 | Variasi Arus Fasa Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi..... | 50 |
| Gambar 4.22 | Gelombang Arus Fasa Stator saat Tanpa Beban | 52 |
| Gambar 4.23 | Harmonisa Arus Stator Fasa a saat Tanpa Beban | 52 |
| Gambar 4.24 | Harmonisa Arus Stator Fasa b saat Tanpa Beban | 53 |
| Gambar 4.25 | Harmonisa Arus Stator Fasa c saat Tanpa Beban..... | 53 |
| Gambar 4.26 | Gelombang Arus Fasa Stator saat Beban Maksimum | 54 |
| Gambar 4.27 | Harmonisa Arus Stator Fasa a saat Beban Maksimum | 54 |
| Gambar 4.28 | Harmonisa Arus Stator Fasa b saat Beban Maksimum | 55 |
| Gambar 4.29 | Harmonisa Arus Stator Fasa c saat Beban Maksimum | 55 |
| Gambar 4.30 | Variasi Tegangan Output terhadap Daya Output | 56 |
| Gambar 4.31 | Gelombang Tegangan Output Saat Tanpa Beban Setelah Optimisasi..... | 57 |
| Gambar 4.32 | Harmonisa Tegangan Output saat Kondisi Tanpa Beban..... | 57 |
| Gambar 4.33 | Gelombang Tegangan Output Saat Beban Maksimum | 58 |
| Gambar 4.34 | Harmonisa Tegangan Output saat Kondisi Beban Maksimum ... | 58 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 4.35 | Variasi Frekuensi Output terhadap Daya Output Setelah Optimisasi | 59 |
| Gambar 4.36 | Efisiensi pada SEIG dengan Perubahan Beban Setelah Optimisasi | 60 |
| Gambar 4.37 | Variasi Tegangan Output Terhadap Penambahan Beban Lebih .. | 61 |
| Gambar 4.38 | Gelombang Arus Output saat Kondisi <i>Voltage Collapse</i> | 62 |
| Gambar 4.39 | Gelombang Tegangan Output saat Kondisi <i>Voltage Collapse</i> | 62 |

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan ribuan pulau yang tersebar di seluruh nusantara. Dengan kondisi geografis tersebut, memberikan tantangan tersendiri dalam penyebaran energi listrik terutama untuk wilayah terpencil. Hampir sebagian besar pulau terpencil di Indonesia belum mendapatkan suplai energi listrik akibat keterbatasan proses transmisi dan distribusi. Salah satu solusi mengatasi masalah tersebut adalah dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan yang tersedia di wilayah terpencil untuk menghasilkan energi listrik. Teknologi yang umum digunakan untuk mengkonversi sumber energi terbarukan menjadi energi listrik adalah generator induksi. Bila dibandingkan dengan generator sinkron, generator induksi memiliki beberapa kelebihan yaitu biaya operasi yang lebih rendah, tidak perlu pemeliharaan secara berkala serta lebih cocok digunakan pada sumber energi terbarukan yang bersifat fluktuatif.

Terdapat dua jenis generator induksi, yaitu *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) dan *Self Excited Induction Generator* (SEIG). Diantara kedua jenis generator induksi tersebut, SEIG merupakan jenis yang cocok untuk diaplikasikan pada wilayah terpencil karena mempunyai sistem eksitasi yang mandiri tanpa harus terhubung dengan *grid*.

Pada wilayah terpencil, dengan sebagian besar beban listrik adalah tipe satu fasa, dibutuhkan sebuah sistem untuk menghasilkan energi listrik satu fasa. Mesin induksi satu fasa dapat dimanfaatkan sebagai SEIG untuk menyuplai beban satu fasa, namun mesin induksi satu fasa memiliki rating daya yang relatif kecil. Untuk rating daya diatas 3kW, mesin tiga fasa memiliki harga yang lebih murah dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan mesin satu fasa (S.N. Mahato, S.P. Sing and M.P. Sharma, 2008). Dengan demikian penggunaan mesin induksi tiga fasa untuk beban satu fasa dapat menjadi pilihan. Dalam memanfaatkan SEIG tiga fasa untuk beban satu fasa, pemilihan kapasitor merupakan hal yang penting. Nilai kapasitor eksitasi akan menentukan besar

tegangan yang dibangkitkan oleh SEIG serta menentukan beban maksimum dari SEIG. Oleh karena itu pada penelitian ini akan membahas pemanfaatan SEIG tiga fasa untuk beban satu fasa dengan optimisasi nilai kapasitor pada SEIG menggunakan sebuah metode *Artificial Intelligence* yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) .

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan – permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah :

1. Memanfaatkan SEIG tiga fasa untuk beban satu fasa.
2. Memperoleh daya output maksimum pada SEIG

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan pada sistem SEIG untuk wilayah terpencil melalui:

1. Melakukan pemodelan SEIG tiga fasa untuk beban satu fasa
2. Optimisasi nilai kapasitor dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk mendapatkan daya output maksimum

1.4 Batasan Masalah

Untuk memudahkan penelitian dan mendapatkan hasil yang baik maka dalam penelitian ini ditetapkan beberapa batasan masalah, antara lain :

1. Analisis sistem SEIG dilakukan pada kondisi *steady state*.
2. Rugi-rugi besi diabaikan pada pemodelan SEIG.
3. Beban yang digunakan adalah beban resistif.
4. Harmonisa pada output SEIG tidak dibahas terperinci.

1.5 Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan pembangkit energi listrik dengan sumber energi terbarukan di wilayah terpencil. Melalui analisis dan metode yang diusulkan, diharapkan dapat meningkatkan pemanfaatan SEIG tiga fasa untuk menyuplai beban satu fasa

dengan tegangan terbangkit yang sesuai rating dan dapat meningkatkan kinerja dari SEIG untuk beban satu fasa.

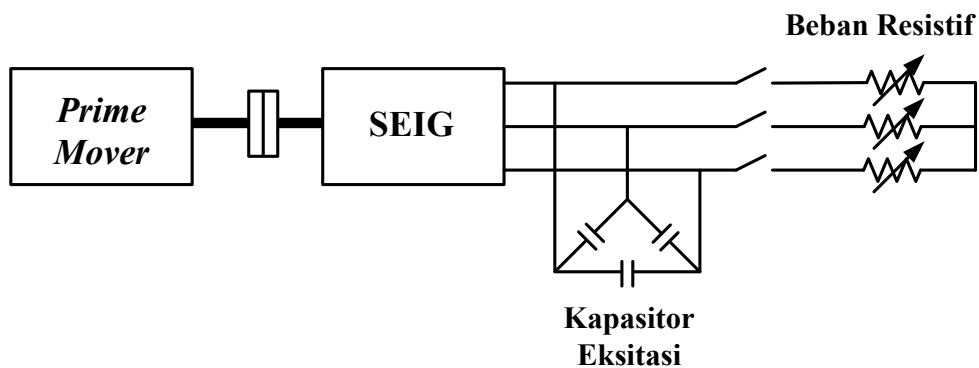
--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 2

SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR (SEIG)

2.1 *Self Excited Induction Generator (SEIG)*

SEIG atau generator induksi penguatan sendiri adalah jenis generator induksi yang memiliki sistem eksitasi secara mandiri. Sistem eksitasi dari SEIG adalah berupa kapasitor yang dipasang secara paralel pada terminal generator seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. SEIG memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG). Kelebihan SEIG antara lain tidak membutuhkan peralatan tambahan seperti inverter, desain yang lebih sederhana dan biaya yang murah serta mampu beroperasi tanpa terhubung dengan *grid*. Dengan demikian, SEIG merupakan jenis generator induksi yang cocok untuk digunakan pada tempat yang terpencil.

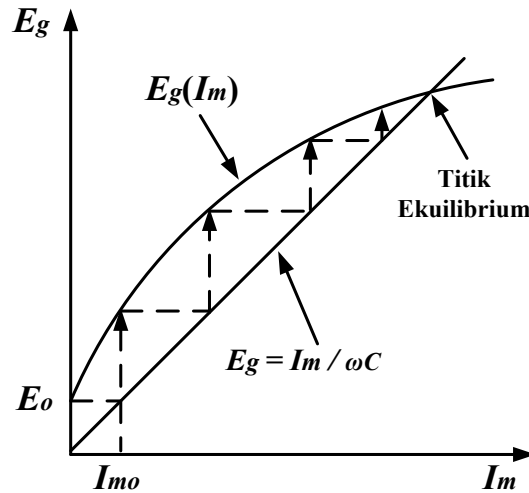


Gambar 2.1 Skema SEIG Tiga Fasa

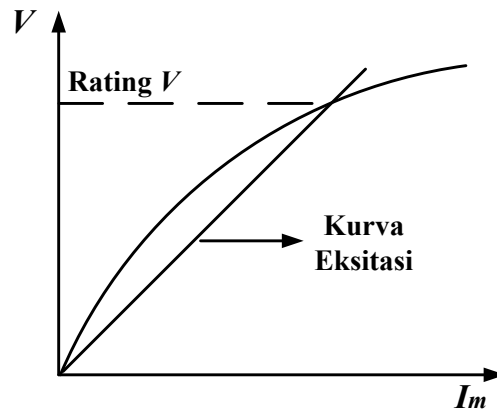
2.1.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari SEIG pada dasarnya menerapkan proses induksi. Ketika rotor diputar pada kecepatan tertentu, sejumlah kecil tegangan akan terinduksi ke kumparan stator akibat adanya sisa medan magnet di rotor. Sejumlah tegangan kecil ini merupakan tegangan awal pada kumparan stator (E_o). Dengan adanya jalur tertutup akibat penempatan kapasitor eksitasi, maka akan mengalir arus magnetisasi awal (I_{mo}). Arus magnetisasi awal ini akan meningkatkan nilai tegangan dengan mengikuti kurva magnetisasi mesin (E_g vs I_m). Proses ini akan terus berlangsung hingga tegangan terbangkit mencapai titik ekuilibrium

(Riawan,D.C, 2009) Titik ekulibrium merupakan perpotongan antara kurva magnetisasi dengan kurva kapasitor seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Karakteristik *steady state* SEIG

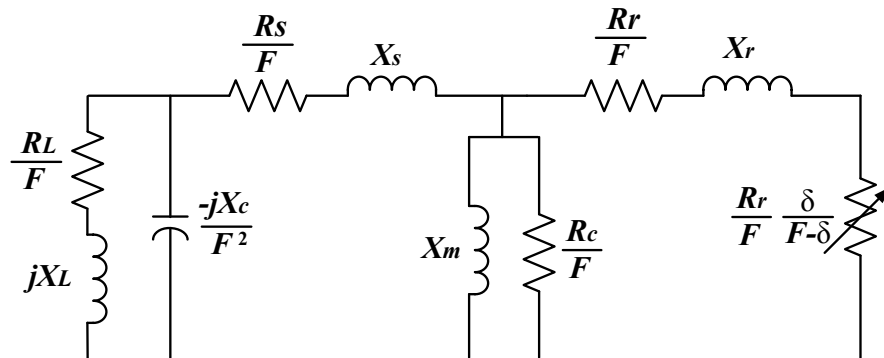


Gambar 2.3 Kurva Karakteristik Magnetisasi

Kapasitas dari kapasitor akan sangat berpengaruh terhadap tegangan yang terbangkit di SEIG. Apabila nilai kapasitansi terlalu kecil maka tegangan yang dibangkitkan akan memiliki nilai yang lebih rendah dari rating tegangan mesin, sementara itu jika kapasitansi bernilai terlalu besar dapat mengakibatkan tegangan lebih pada mesin. Dengan demikian pemilihan kapasitor yang tepat sangat dibutuhkan agar dihasilkan tegangan sesuai dengan yang diinginkan.

2.1.2 Rangkaian Ekivalen

Rangkaian ekivalen dari SEIG tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.4. Terlihat bahwa SEIG memiliki rangkaian ekivalen yang mirip dengan rangkaian ekivalen motor induksi, hanya saja terdapat penambahan kapasitor eksitasi pada rangkaian ekivalen SEIG.



Gambar 2.4 Rangkaian Ekivalen SEIG Tiga Fasa

- R_L : resistansi beban (ohm)
- X_L : reaktansi beban (ohm)
- F : frekuensi stator (pu)
- δ : kecepatan rotor (pu)

Dalam melakukan analisis performa SEIG, dapat dilakukan pemodelan SEIG dalam kondisi *steady state*. Pemodelan dapat dilakukan dengan dua metode yaitu metode admitansi dan metode impedansi. Pada metode admitansi, rangkaian ekivalen SEIG akan dibuat dalam bentuk admitansi sementara pada metode impedansi rangkaian ekivalen dibuat dalam bentuk impedansi.

2.2 Penentuan Parameter pada Mesin Induksi

Penentuan parameter mesin induksi merupakan hal yang penting sebelum melakukan pemodelan mesin induksi. Hal ini dikarenakan parameter yang diperoleh akan mempengaruhi karakteristik dan performa dari mesin induksi. Adapun parameter yang dibutuhkan adalah resistansi stator (R_s), resistansi rotor (R_r), reaktansi induktif stator (X_s) dan reaktansi induktif rotor (X_r). Parameter –

parameter ini diperoleh dengan melakukan pengujian pada mesin induksi yaitu *No-load Test*, *DC Test* dan *Locked Rotor Test* (Chapman. S.J., 2005).

Pengujian untuk memperoleh parameter mesin dilakukan pada mesin induksi yang akan digunakan saat eksperimen. Hal ini bertujuan agar diperoleh parameter mesin induksi dengan kondisi yang riil. Adapun spesifikasi mesin induksi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan parameter mesin induksi yang diperoleh pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Rating Mesin Induksi

| | |
|---|-------------|
| Tipe | EM 802-4 |
| Nomor Seri | 50062 |
| kW/hp | 0.75/1 |
| Tegangan (Δ - Y) | 220 V/380 |
| Arus (Δ - Y) | 3.6 A/2.1 A |
| Frekuensi | 50 Hz |
| Kecepatan | 1380 rpm |
| Jumlah pole | 4 |

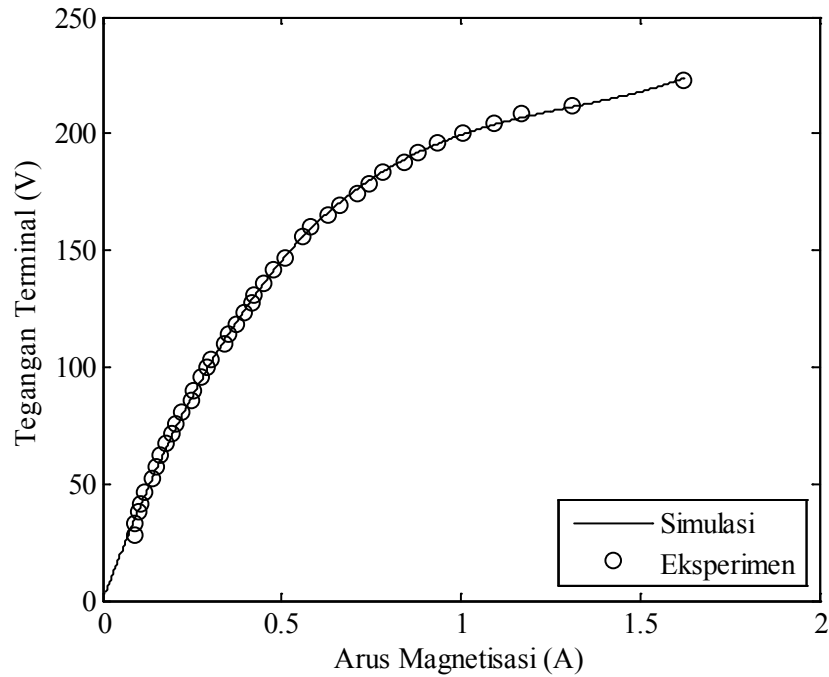
Tabel 2.2 Parameter Mesin Induksi

| Parameter | Nilai |
|------------------|----------------|
| R_s | 11,14 Ω |
| R'_r | 6,37 Ω |
| X_s | 15,57 Ω |
| X'_r | 15,57 Ω |

2.3.1. Kurva Saturasi Magnetik

Saturasi magnetik pada mesin induksi memiliki peran yang penting ketika beroperasi sebagai SEIG. Kurva Saturasi magnetik dapat diperoleh dengan mengoperasikan mesin induksi sebagai motor dan diputar dalam kondisi tidak berbeban. Tegangan input yang diberikan akan divariasikan mulai 0% hingga melebihi rating tegangan. Saat dilakukan pengujian untuk memperoleh data saturasi magnetik, belitan stator terhubung delta dan tegangan input dinaikkan

secara bertahap mulai dari 0V hingga 250V. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, maka diperoleh kurva saturasi magnetik seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva Saturasi Magnetik Mesin Induksi

$$X_m = X_c$$

$$C = \frac{1}{\omega X_m} \quad (2.12)$$

Nilai kapasitor yang dibutuhkan oleh SEIG dapat diperoleh dengan menggunakan nilai X_m pada kondisi tegangan nominal. Nilai dari X_m dapat diperoleh dengan melakukan pengujian tanpa beban pada mesin induksi. Dengan menggunakan persamaan (2.1) maka nilai kapasitor eksitasi dapat diperoleh. Dengan memperoleh nilai X_m pada pengujian tanpa beban yang telah dilakukan, maka didapatkan nilai C minimum adalah $\sim 18,762\mu\text{F}$ per fasa.

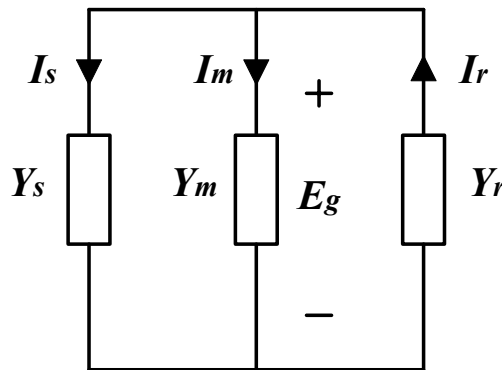
2.3 Self Excited Induction Generator Tiga Fasa

Pengoperasian SEIG untuk beban tiga fasa telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Arista.N, 2012). Pada penelitian tersebut dilakukan pemodelan *steady state* SEIG tiga fasa dengan metode admitansi.

2.3.1. Metode Admitansi

Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk melakukan pemodelan *steady state* dari SEIG yaitu metode impedansi dan metode admitansi. Pada penelitian sebelumnya dipilih metode admitansi karena memiliki kesederhanaan dalam iterasi numerik.

Dalam metode admitansi, dilakukan penyederhanaan rangkaian ekuivalen SEIG tiga fasa pada Gambar 2.4. Penyederhanaan ini dilakukan dengan membuat rangkaian ekuivalen baru yang terdiri atas tiga admitansi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pemodelan Admitansi SEIG

(a) Admitansi Rangkaian Stator (Y_s)

Admitansi stator diperoleh dari kombinasi parameter stator, kapasitor dan impedansi beban sehingga diperoleh persamaan (2.13).

$$Y_s = \frac{1}{\left(\frac{R_L}{F} + jX_L \right) // \frac{-jX_c}{a^2} + \left(\frac{R_1}{F} + jX_1 \right)} \quad (2.13)$$

(b) Admitansi Rangkaian Magnetisasi (Y_m)

Admitansi rangkaian magnetisasi diperoleh dengan melakukan paralel antara X_m dan R_c .

$$Y_m = \frac{F}{R_c} - \frac{1}{X_m} \quad (2.14)$$

(c) Admitansi Rangkaian Rotor (Y_r)

Admitansi rotor diperoleh dari kombinasi parameter rotor dan slip yang direpresentasikan dalam bentuk $(F-\delta)$.

$$Y_r = \frac{\frac{R_r}{F-\delta}}{\left(\frac{R_r}{F-\delta}\right)^2 + X_r^2} + j \frac{\frac{X_r}{F-\delta}}{\left(\frac{X_r}{F-\delta}\right)^2 + X_r^2} \quad (2.15)$$

Pada kondisi pembangkitan tegangan, total arus pada rangkaian admitansi ditunjukkan oleh persamaan (2.16).

$$I_s + I_m + I_r = E_g Y_s + E_g Y_r + E_g Y_m = 0 \quad (2.16)$$

Pada saat proses pembangkitan tegangan, E_g tidak akan bernilai 0, dengan demikian untuk memenuhi persamaan (2.16) maka total admitansi harus bernilai 0. Dapat dilihat bahwa nilai admitansi terdiri atas bagian riil dan imajiner. Karena total admitansi akan bernilai 0, maka bagian riil dan imajiner dari admitansi akan bernilai 0 seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2.17) dan (2.18).

$$\Re(Y_s) + \Re(Y_r) + \Re(Y_m) = 0 \quad (2.17)$$

$$F(F, \delta, X_s, X_r, X_L, X_c, R_r, R_s, R_L, R_c) = 0$$

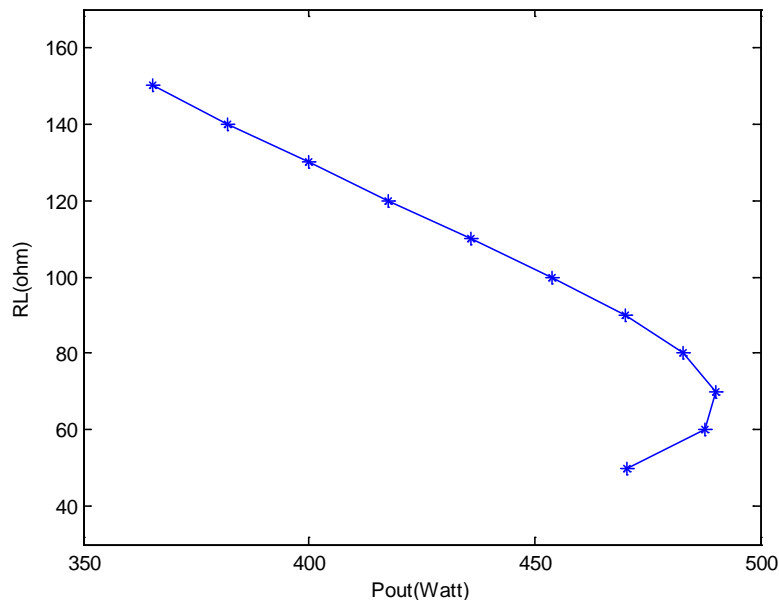
$$\text{Im}(Y_s) + \text{Im}(Y_r) + \text{Im}(Y_m) = 0 \quad (2.18)$$

$$F(F, \delta, X_s, X_r, X_L, X_c, R_r, R_s, R_L, R_c) = 0$$

Dari kedua persamaan diatas, terdapat dua parameter yang tidak diketahui yaitu F dan X_m . Dengan menggunakan *optimization tool* di *software* Matlab[®] seperti “*fzero*” atau “*fsolve*” maka nilai F dan X_m dapat diperoleh.

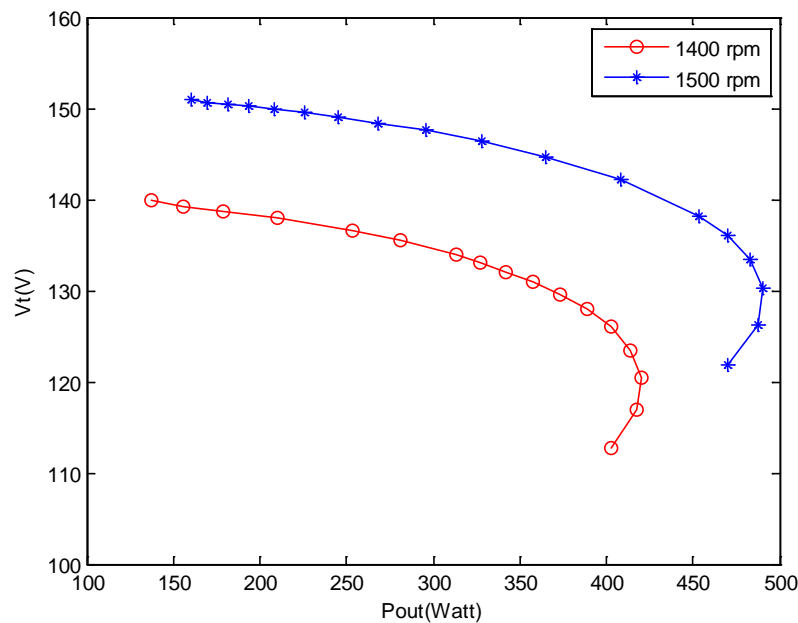
2.3.2. Performa SEIG Tiga Fasa

Perhitungan performa dari SEIG tiga fasa dapat dilakukan dengan menggunakan pemodelan *steady state* dari SEIG tiga fasa. Adapun persamaan detail yang digunakan untuk menghitung performa dari SEIG tiga fasa telah dibahas pada penelitian sebelumnya (N. Arista., 2012). Dari penelitian tersebut, dapat dianalisis karakteristik performa dari SEIG sebagai berikut.



Gambar 2.7 Grafik Resistansi Beban Terhadap Daya Output

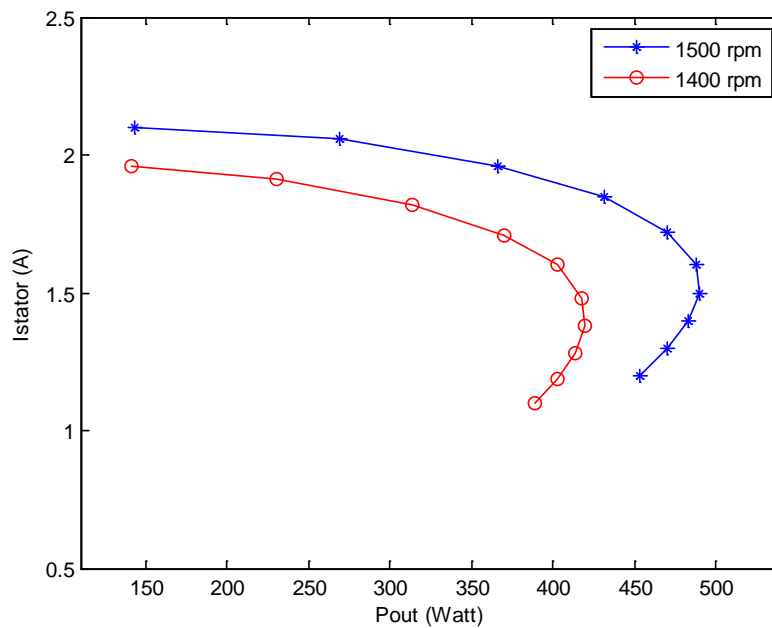
Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik daya output SEIG terhadap perubahan beban. Terlihat bahwa semakin besar beban, maka daya output dari SEIG akan meningkat. Namun, SEIG memiliki batasan titik kerja dimana ketika titik kerja dari SEIG terlampaui daya output dari SEIG akan menurun meskipun terjadi kenaikan beban.



Gambar 2.8 Grafik Tegangan Terminal dan Daya Output Terhadap Perubahan Kecepatan

Kemampuan transfer daya dari SEIG akan ditentukan oleh nilai kapasitor eksitasi dan kecepatan putar rotor. Ketika beban dinaikkan secara bertahap, SEIG akan mencapai nilai maksimum dari daya output. Ketika SEIG dioperasikan melebihi kemampuan daya maksimumnya, maka akan terjadi penurunan tegangan di terminal stator seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8. Selain itu terlihat pula bahwa semakin besar kecepatan rotor maka semakin besar daya output yang dapat dihasilkan oleh SEIG dengan asumsi nilai kapasitor eksitasi yang sama.

Selain mempengaruhi daya output, kecepatan rotor juga akan mempengaruhi arus yang mengalir di stator. Dengan nilai kapasitor yang sama, SEIG yang berputar dengan kecepatan lebih tinggi akan memiliki nilai arus dan daya output yang lebih besar. Sementara itu, arus di belitan stator akan menurun seiring dengan penambahan beban. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Grafik Arus Stator dan Daya Output Terhadap Perubahan Kecepatan

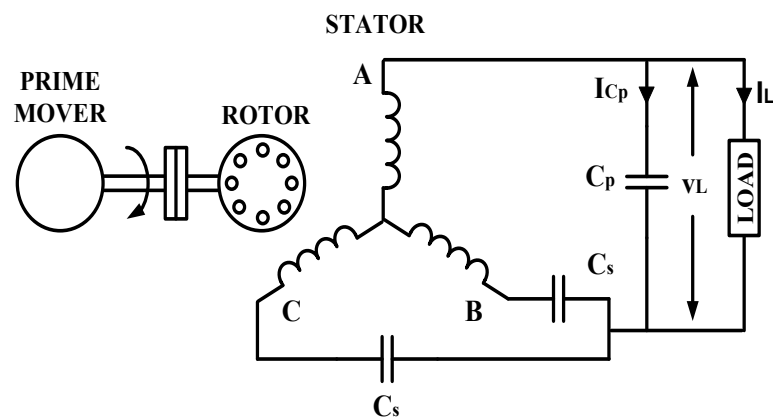
Dari hasil penelitian SEIG tiga fasa sebelumnya, diketahui bahwa saat beroperasi untuk beban tiga fasa, SEIG tidak memiliki permasalahan tertentu. Sebaliknya, ketika SEIG dioperasikan untuk beban satu fasa akan timbul permasalahan. Permasalahan yang timbul antara lain adalah kondisi tidak seimbang pada belitan stator. Oleh karena itu pengoperasian SEIG untuk beban satu fasa akan dianalisis lebih lanjut pada penelitian ini.

BAB 3

***SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR* UNTUK BEBAN SATU FASA**

3.1 Pemodelan *Steady State* SEIG Tiga Fasa untuk Beban Satu Fasa

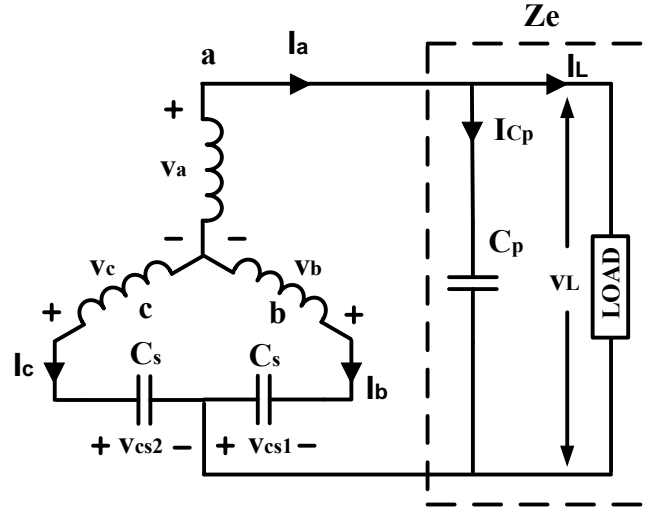
Skema SEIG tiga fasa dengan belitan stator terhubung *wye* dapat dilihat pada Gambar 3.1. Skema tersebut menunjukkan bahwa pada penelitian ini akan digunakan tiga buah kapasitor eksitasi yaitu satu buah kapasitor yang terhubung paralel (C_p) dan dua buah kapasitor yang terhubung seri (C_s). Sementara itu, pada penelitian ini beban yang akan digunakan adalah beban resistif satu fasa.



Gambar 3.1 Skema SEIG Tiga Fasa untuk Beban Satu Fasa

3.1.1 Rangkaian Ekuivalen SEIG untuk Beban Satu Fasa

Untuk memperoleh rangkaian ekuivalen akhir SEIG untuk beban satu fasa, terlebih dahulu akan dilakukan analisis rangkaian ekuivalen ketika generator bekerja pada frekuensi rating. Rangkaian ekuivalen ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen SEIG

V_a, V_b, V_c = tegangan terminal stator fasa a, b dan c

V_{cs}, V_L = tegangan kapasitor seri dan tegangan beban

I_a, I_b, I_c, I_{cp} = arus terminal stator fasa a, b, c dan arus kapasitor paralel

Z_e = impedansi kapsitor paralel dan beban

V_{ap} = tegangan urutan positif fasa a

V_{an} = tegangan urutan negatif fasa a

Karena pada penelitian ini belitan stator terhubung *wye*, maka tidak akan ada komponen urutan nol. Dengan demikian, I_a, I_b , dan I_c dapat diperoleh menggunakan komponen simetris pada persamaan (3.1), dengan I_{ap} dan I_{an} masing-masing adalah arus urutan positif dan urutan negatif fasa a .

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ap} + I_{an} \\ I_b &= a^2 I_{ap} + a I_{an} \\ I_c &= a I_{ap} + a^2 I_{an} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Dari analisa rangkaian ekivalen pada Gambar 3.2, maka akan diperoleh tegangan antar fasa pada belitan stator

$$\begin{aligned}
V_L - V_{cs1} + V_b - V_a &= 0 \\
V_a - V_b &= V_L - V_{cs1} \\
V_{ab} &= Z_e I_a - (-jX_{cs} I_b)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
V_{cs2} - V_{cs1} + V_b - V_c &= 0 \\
V_b - V_c &= V_{cs1} - V_{cs2} \\
V_{bc} &= -jX_{cs} I_b - (-jX_{cs} I_c)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
V_L - V_{cs2} + V_c - V_a &= 0 \\
V_c - V_a &= V_{cs2} - V_L \\
V_{ca} &= (-jX_{cs} I_c) - Z_e I_a
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Dengan melakukan substitusi persamaan (3.1) ke persamaan (3.2), (3.3) dan (3.4) , maka tegangan urutan positif dan negatif fasa a dapat diperoleh

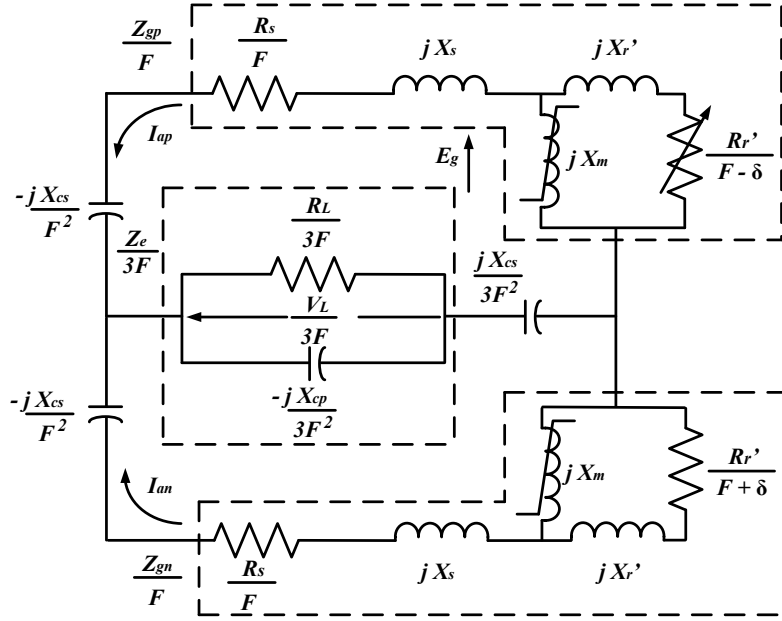
$$\begin{aligned}
V_{ap} &= \frac{1}{3}(V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}) \\
&= \frac{1}{3}\{(Z_e - j2X_{cs})(1 - a^2)I_{ap} + (Z_e + jX_{cs})(1 - a^2)I_{an}\} \\
V_{an} &= \frac{1}{3}(V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca}) \\
&= \frac{1}{3}\{(Z_e + jX_{cs})(1 - a)I_{ap} + (Z_e - 2jX_{cs})(1 - a)I_{an}\}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Sementara itu, jika menyatakan V_{ap} dan V_{an} menggunakan impedansi generator urutan positif dan negatif maka akan diperoleh persamaan (3.6)

$$\begin{aligned}
V_{ap} &= -(1 - a^2)Z_{gp} I_{ap} \\
V_{an} &= -(1 - a)Z_{gn} I_{an}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Dari persamaan (3.5) dan (3.6) maka dapat dibentuk matriks impedansi dari SEIG seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.7) (S.Miyairi., 1992) .

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}Z_e - j\frac{2}{3}X_{cs} + Z_{gp} & \frac{1}{3}(Z_e + jX_{cs}) \\ \frac{1}{3}(Z_e + jX_{cs}) & \frac{1}{3}Z_e - j\frac{2}{3}X_{cs} + Z_{gn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ap} \\ I_{an} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



Gambar 3.3 Rangkaian Ekuivalen *Steady State* SEIG Untuk Beban Satu Fasa (F. Tadashi, K. Yuichi, 1999)

- X_{cs} : Reaktansi kapasitor C_s (pu)
- X_{cp} : Reaktansi kapasitor C_p (pu)
- X_m : Reaktansi magnetisasi per fasa (pu)
- F : Frekuensi generator (pu)
- R_s : Resistansi per fasa stator (pu)
- R_r' : Resistansi per fasa rotor (pu)
- X_s : Reaktansi per fasa stator (pu)
- X_r' : Reaktansi per fasa rotor (pu)
- R_L : Resistansi beban (pu)
- δ : Kecepatan putar rotor (pu)
- Z_{gp} : Komponen urutan positif SEIG (pu)
- Z_{gn} : Komponen urutan negatif SEIG (pu)
- Z_e : Impedansi ekuivalen antara beban dan kapasitor C_p

- E_g : Tegangan terbangkit pada generator (pu)
 I_{ap}, I_{an} : Arus stator urutan positif dan negatif (pu)

Dengan matriks impedansi ini, rangkaian ekivalen SEIG yang bekerja pada frekuensi rating dapat diperoleh . SEIG untuk beban satu fasa akan bekerja pada frekuensi yang bervariasi, oleh karena itu frekuensi per unit dan kecepatan rotor harus dinyatakan dalam rangkaian ekivalen. Dengan demikian rangkaian ekivalen akhir SEIG untuk beban satu fasa ditunjukkan oleh Gambar 3.3.

3.1.2 Metode Impedansi

Metode impedansi akan digunakan dalam pemodelan *steady state* SEIG untuk beban satu fasa. Untuk mempermudah mendapatkan impedansi total rangkaian, maka digunakan tiga impedansi yaitu, Z_{gp}/F , Z_{gn}/F dan $Z_e/3F$.

- (a) Impedansi komponen urutan positif (Z_{gp}/F)

Impedansi komponen urutan positif dapat diperoleh dari kombinasi stator, rotor dan reaktansi magnetisasi pada komponen urutan positif sebagai berikut :

$$\frac{Z_{gp}}{F} = \left(\frac{R_s}{F} + jX_s \right) + \left[\frac{(jX_m) \left(\frac{R'_r}{F - \delta} + jX'_r \right)}{\frac{R'_r}{F - \delta} + j(X_m + X'_r)} \right] \quad (3.8)$$

- (b) Impedansi komponen urutan negatif (Z_{gn}/F)

Impedansi komponen urutan positif dapat diperoleh dari kombinasi stator, rotor dan reaktansi magnetisasi pada komponen urutan negatif sebagai berikut :

$$\frac{Z_{gn}}{F} = \left(\frac{R_s}{F} + jX_s \right) + \left[\frac{(jX_m) \left(\frac{R'_r}{F + \delta} + jX'_r \right)}{\frac{R'_r}{F + \delta} + j(X_m + X'_r)} \right] \quad (3.9)$$

(c) Impedansi ekivalen beban dan kapasitor C_p ($Z_e/3F$)

Impedansi ini diperoleh dengan melakukan hubungan paralel antara kapasitor C_p dengan resistansi beban sebagai berikut :

$$\frac{Z_e}{3F} = \frac{\left(\frac{R_L}{3F}\right) \left(-\frac{jX_{cp}}{3F^2}\right)}{\left(\frac{R_L}{3F}\right) + \left(-\frac{jX_{cp}}{3F^2}\right)} \quad (3.10)$$

Dengan menggunakan ketiga impedansi diatas, maka impedansi total rangakaian ekivalen SEIG untuk beban satu fasa dapat diperoleh dan ditunjukkan pada persamaan (3.11)

$$Z = \left(\frac{Z_{gp}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2}\right) + \left[\left(\frac{Z_{gn}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2}\right) // \left(\frac{Z_e}{3F} + \frac{jX_{cs}}{3F^2}\right)\right]$$

$$Z = \left(\frac{Z_{gp}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2}\right) + \left[\frac{\left(\frac{Z_{gn}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2}\right) \left(\frac{Z_e}{3F} + \frac{jX_{cs}}{3F^2}\right)}{\left(\frac{Z_{gn}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2}\right) + \left(\frac{Z_e}{3F} + \frac{jX_{cs}}{3F^2}\right)}\right] \quad (3.11)$$

3.1.3 Konversi Parameter SEIG dalam Satuan per Unit

Pada pemodelan SEIG untuk beban satu fasa akan digunakan parameter mesin yang telah disebutkan pada bab sebelumnya. Namun pemodelan SEIG untuk beban satu fasa dalam penelitian ini akan dilakukan dalam satuan per unit. Dengan demikian perlu dilakukan konversi satuan dari seluruh paramater ke satuan per unit. Nilai *base* dari tegangan dan arus diperoleh dari rating mesin induksi saat terhubung *wye*, sementara itu nilai *base* dari impedansi dan daya diperoleh dengan menggunakan persamaan (3.12) dan (3.13).

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{220}{2,1} = 104,762\Omega \quad (3.12)$$

$$P_{base} = V_{base} \times I_{base} = 220 \times 2,1 = 462W \quad (3.13)$$

V_{base} = tegangan *base*

I_{base} = arus *base*

Z_{base} = impedansi *base*

P_{base} = daya *base*

Dengan menggunakan nilai Z_{base} yang diperoleh, maka akan didapatkan nilai parameter SEIG dalam satuan per unit. Parameter SEIG dalam satuan per unit dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter SEIG dalam Satuan Per Unit

| Parameter | Nilai |
|-----------|-----------|
| R_s | 0,1063 pu |
| R'_r | 0,0608 pu |
| X_s | 0,1487 pu |
| X'_r | 0,1487 pu |

3.2 Penentuan Nilai Frekuensi dan Reaktansi Magnetisasi

Dapat dilihat pada persamaan (3.13) bahwa Z total akan memiliki bagian riil dan imajiner. Dengan menggunakan rangkaian ekivalen SEIG pada Gambar 3.3, maka dapat diperoleh persamaan *loop* arus I_{ap} seperti ditunjukkan persamaan (3.14) berikut

$$ZI_p = 0 \quad (3.14)$$

Karena I_{ap} tidak akan bernilai 0 saat proses pembangkitan, maka untuk memenuhi persamaan (3.14) Z akan bernilai 0. Ketika Z bernilai 0, maka bagian riil dan imajiner dari Z akan bernilai 0 seperti ditunjukkan persamaan (3.15) dan (3.16) dibawah ini

$$\begin{aligned} \Re(Z) &= 0 \\ F(F, \delta, R_s, R_r, R_L, X_s, X_r, X_{cs}, X_{cp}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

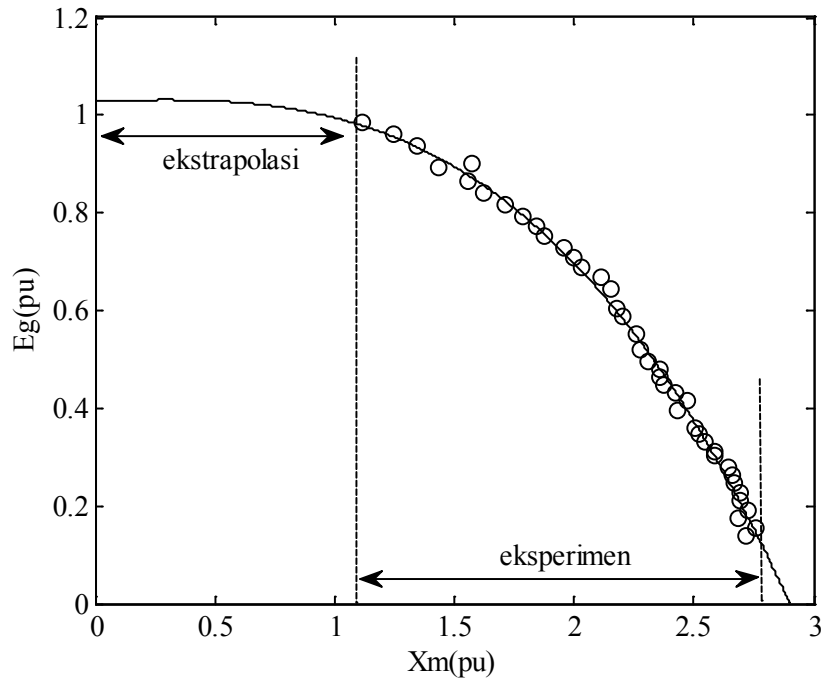
$$\begin{aligned} \text{Im}(Z) &= 0 \\ F(F, \delta, R_s, R_r, R_L, X_s, X_r, X_{cs}, X_{cp}) &= 0 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Dengan memisahkan bagian riil dan imajiner dari Z , maka akan diperoleh dua persamaan tak linear seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (3.15) dan (3.16). Dari kedua persamaan tersebut, terdapat dua variabel yang tidak diketahui yaitu F dan X_m . Nilai F dan X_m akan bervariasi sesuai perubahan beban pada nilai X_c tertentu. Dengan menggunakan *optimization tool* di *software* Matlab[®] yaitu “*fsolve*”, maka parameter F dan X_m dapat diperoleh.

3.3 Identifikasi Tegangan Terbangkit (E_g)

Tegangan terbangkit (E_g) di kumparan stator SEIG akan dipengaruhi oleh nilai X_m . Dengan demikian untuk memperoleh nilai E_g akan digunakan kurva E_g terhadap X_m . Data untuk kurva diperoleh dari pengujian yang telah dilakukan. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan mesin sebagai motor induksi dan diputar pada kondisi tanpa beban dengan tegangan suplai bervariasi. Dari pengujian tersebut nilai E_g dapat diperoleh dengan persamaan (3.17). Hasil dari pengujian akan diplot untuk membentuk kurva. Ekstrapolasi dibutuhkan untuk memperpanjang kurva pada nilai tegangan yang lebih tinggi yang tidak dapat diperoleh dari pengujian.

$$E_g = X_m I_m \tag{3.17}$$



Gambar 3.4 Kurva Tegangan Terbangkit (E_g) Terhadap R eaktansi Magnetisasi (X_m)

$$\begin{aligned}
 X_m < 0,975 & \quad E_g = 1 \\
 0,975 < X_m < 2,9 & \quad E_g = -0,0415X_m^3 - 0,0716X_m^2 + 0,0153X_m + 1,0287 \quad (3.18) \\
 X_m > 2.9 & \quad E_g = 0
 \end{aligned}$$

Dari kurva E_g terhadap X_m , maka dapat diperoleh fungsi E_g terhadap X_m seperti pada persamaan (3.18). Dengan persamaan tersebut, nilai E_g dapat diperoleh pada berbagai kondisi beban.

3.4 Optimisasi Nilai Kapasitor Eksitasi dengan PSO

Penggunaan metode PSO untuk optimisasi kapasitor bertujuan untuk memperoleh nilai kapasitor yang tepat sehingga SEIG memiliki daya keluaran lebih dari 30% dari rating mesin induksi. Selain itu optimisasi kapasitor ini bertujuan agar ketika dibebani, arus belitan stator dan tegangan ke beban masih dalam batas yang diizinkan.

3.4.1 *Objective Function dan Constraint*

Proses optimisasi akan dilakukan pada tiga buah kapasitor eksitasi, yaitu satu buah kapasitor paralel (C_p) dan dua buah kapasitor seri (C_s). *Objective function* pada program optimisasi yang dilakukan adalah untuk mendapatkan impedansi total (Z) yang bernilai 0. *Objective function* dari permasalahan ini dapat dilihat pada persamaan (3.19).

$$\text{Minimize} \quad Z(X_m, F) \quad (3.19)$$

Variabel yang akan dikontrol dari persamaan (3.19) adalah batas arus belitan stator dan tegangan beban. Sehingga penelitian ini akan memiliki *constraint* sebagai berikut

- (a) Batas arus belitan stator

$$I_i \leq I_{\max} \quad i = a, b, c$$

- (b) Tegangan Beban

$$V_{\min} \leq V_L \leq V_{\max}$$

Arus pada belitan stator akan dijaga sehingga tidak melebihi arus maksimum (I_{\max}) yang tertera pada *nameplate*. Dari rating mesin induksi pada Tabel 2.1 bahwa saat hubungan *wye*, mesin induksi akan memiliki arus maksimum (I_{\max}) 2,1 A. Sementara itu, karena SEIG akan beroperasi untuk menyuplai beban satu masa maka nilai minimum dari tegangan beban adalah 10% dari 220 V dan tegangan maksimum adalah 5% dari 220V. Variasi tegangan +5% dan -10% ini disesuaikan dengan standar yang berlaku di Indonesia (SPLN, 1995).

3.4.2 *Algoritma PSO*

Algoritma PSO yang umum diketahui diadaptasi dari perilaku sosial kawanan burung di alam. Kata partikel pada PSO menunjukkan seekor burung dalam kawanannya. Setiap partikel memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang tertentu dan akan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui (berupa fungsi nilai objektif). Partikel akan

menyampaikan informasi atau posisi informasi atau posisi yang baik sehingga partikel-partikel lain akan menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing berdasarkan informasi yang diterima (Singiresu S. Rao. ,2009). Langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan optimisasi C_s dan C_p dengan PSO adalah sebagai berikut :

- (1) Menentukan jumlah kawanan (N) dan partikel. Karena pada penelitian ini akan dilakukan optimisasi C_s dan C_p maka akan terdapat dua partikel.
- (2) Inisiasi posisi awal C_s dan C_p secara acak. Selanjutnya menetapkan posisi (X) dan kecepatan (V) selama iterasi.

$$X_j(i) = \text{posisi partikel-}j \text{ pada iterasi ke-}i$$

$$V_j(i) = \text{kecepatan partikel-}j \text{ pada iterasi ke-}i$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

- (3) Hitung nilai *fitness* dari *objective function* , yaitu nilai Z .
- (4) Menentukan P_{best} dan G_{best} , dimana P_{best} merupakan posisi terbaik C_s dan C_p ke- j pada iterasi ke- i sementara G_{best} adalah posisi terbaik dari keseluruhan C_s dan C_p pada iterasi ke- i . Karena *objective function* pada pada penelitian ini merupakan nilai minimum dari Z , maka akan dipilih C_s dan C_p dengan nilai *fitness* paling rendah.
- (5) Menghitung *update* kecepatan dan posisi C_s dan C_p ke- j pada iterasi ke- i

$$V_j(i) = w * V_j(i-1) + c_1 r_1 |P_{best,j} - X_j(i-1)| + c_2 r_2 |G_{best} - X_j(i-1)| \quad (3.20)$$

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \quad (3.21)$$

Dimana c_1 , c_2 dan masing-masing ditetapkan bernilai 0,1, sedangkan r_1 dan r_2 adalah bilangan acak.

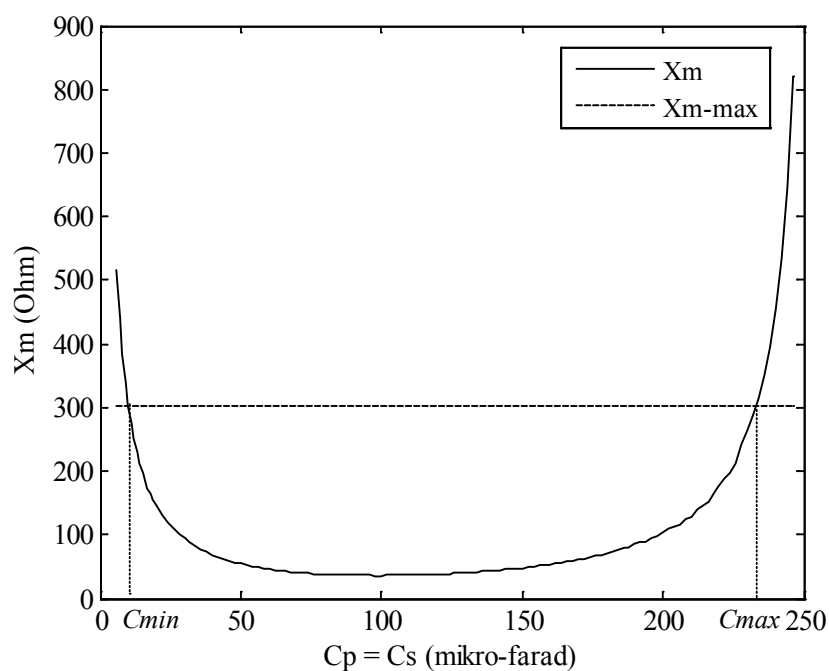
- (6) Melakukan pengecekan apakah solusi yang dihasilkan telah konvergen . Solusi dikatakan konvergen ketika posisi C_s dan C_p menuju ke nilai yang sama. Jika belum, maka akan dilakukan pengulangan pada langkah ke (3) dan (4) dan iterasi akan diperbarui $i = i+1$.

3.4.3 Batas Maksimum dan Minimum Kapasitor

Menentukan batas maksimum dan minimum dari variabel yang dioptimisasi merupakan hal yang penting. Selain agar proses optimisasi terarah,

penentuan batas nilai C_s dan C_p dapat menentukan proses *self excitation* pada SEIG. Agar SEIG dapat melakukan *self excitation* nilai X_m harus kurang atau sama dengan nilai X_{m-max} (S.N. Mahato, S.P. Singh and M.P. Sharma. , 2007)

Untuk memperoleh batas nilai C_s dan C_p , SEIG akan diberikan nilai kapasitansi yang bervariasi pada kondisi tanpa beban. Dalam hal ini nilai C_s dan C_p diasumsikan sama. Sementara itu nilai X_{m-max} telah diperoleh pada bagian 3.5 yaitu 2,9 pu atau 303,81 ohm. Kurva X_m dengan variasi nilai C dapat dilihat pada Gambar 3.5

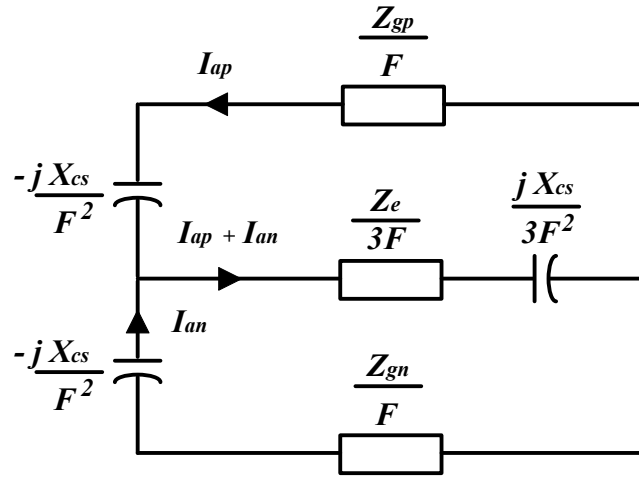


Gambar 3.5 Kurva Variasi X_m terhadap C

Dapat dilihat dari Gambar 3.5 bahwa terdapat dua titik pada kurva X_m yang memotong garis X_{m-max} . Titik paling kiri merupakan nilai kapasitansi minimum (C_{min}) sementara titik disebelah kanan merupakan nilai kapasitansi maksimum (C_{max}). Nilai C_{min} dan C_{max} yang diperoleh masing-masing adalah 10 μ F dan 234 μ F. Nilai C_{min} dan C_{max} yang diperoleh ini selanjutnya digunakan sebagai batasan minimum dan maksimum dalam optimisasi C_s dan C_p pada PSO. Sebelum itu, nilai C_{min} dan C_{max} akan diubah menjadi nilai $X_{c_{min}}$ dan $X_{c_{max}}$ dalam satuan per unit masing-masing adalah 3,04 pu dan 0,13 pu.

3.5 Perhitungan Performa SEIG untuk Beban Satu Fasa

Perhitungan performa SEIG untuk beban satu fasa dapat dilakukan dengan menganalisa rangkaian ekivalen SEIG dalam kondisi *steady state*. Rangkaian ekivalen SEIG untuk beban satu fasa dapat dilihat pada Gambar 3.3. Dari rangkaian ekivalen terlihat bahwa terdapat dua aliran arus pada rangkaian ekivalen SEIG yaitu I_{ap} dan I_{an} . Nilai I_{ap} dapat diperoleh dengan melakukan pembagian antara tegangan terbangkit (E_g) dengan total impedansi (Z) dari rangkaian ekivalen. Adapun nilai Z telah dijabarkan pada persamaan (3.13).



Gambar 3.6 Penyederhanaan Rangkaian Ekivalen SEIG

$$I_{ap} = \frac{E_g}{Z}$$

$$I_{ap} = \frac{E_g}{\frac{R_s}{F} - j\frac{X_{cs}}{F^2} + \left(\frac{\frac{Z_{gn}}{F} - j\frac{X_{cs}}{F^2}}{\left(\frac{Z_e}{3F} + j\frac{X_{cs}}{3F^2} \right)} \right)} \quad (3.22)$$

Setelah memperoleh I_{ap} , nilai I_{an} dapat diperoleh. Dengan asumsi bahwa I_{ap} merupakan penjumlahan antara I_{an} dan I , maka I_{an} dapat diperoleh dengan pembagian arus seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.23). I_{an} akan bernilai negatif karena memiliki arah yang berlawanan dengan I_{ap} .

$$I_{an} = - \frac{\frac{Z_e}{3F} + j \frac{X_{cs}}{3F^2}}{\frac{Z_e}{3F} + \frac{Z_{gn}}{F} - j \frac{2X_{cs}}{3F^2}} I_{ap} \quad (3.23)$$

Dengan memperoleh I_{ap} dan I_{an} , maka I yang merupakan arus ke beban dapat diperoleh. Dapat dilihat pada Gambar 3.6 bahwa penjumlahan I_{ap} dan I_{an} akan mengalir ke impedansi $Z_e/3F$ yang merupakan impedansi antara R_L dan X_{cp} . Pembagian arus kembali digunakan untuk mendapatkan arus ke beban seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.24).

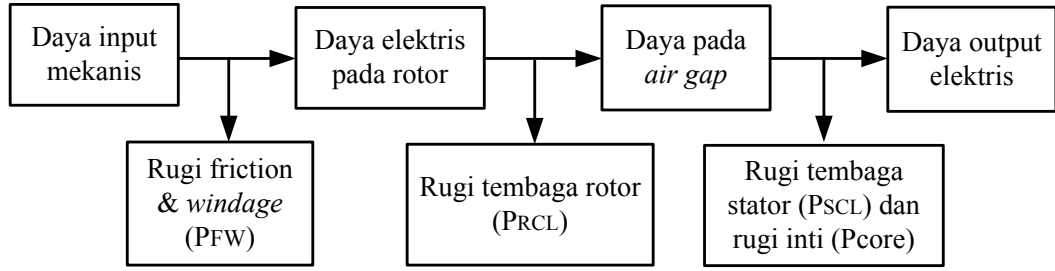
$$I = \frac{-j \frac{X_{cp}}{F^2}}{\frac{R_L}{F} - j \frac{X_{cp}}{F^2}} (I_{ap} + I_{an}) \quad (3.24)$$

Tegangan output dan daya output dari SEIG untuk beban satu fasa dapat diperoleh dengan menggunakan arus ke beban dan resistansi dari beban, sesuai pada persamaan (3.25) dan (3.26).

$$V_L = R_L I \quad (3.25)$$

$$P_o = |I|^2 R_L \quad (3.26)$$

Hal selanjutnya yang perlu dilakukan untuk menganalisis performa dari SEIG adalah dengan melihat efisiensi dari SEIG. Untuk memperoleh efisiensi dari SEIG, perlu dihitung terlebih dahulu daya dari SEIG yang berupa daya input, dan rugi-rugi daya yang timbul selama proses pembangkitan. Diagram alir dari daya pada SEIG dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Aliran Daya pada *Self Excited Induction Generator* (SEIG)

Saat beroperasi sebagai SEIG, daya input yang berupa daya mekanis akan ditransfer dari poros ke rotor. Setelah terjadi pengurangan akibat rugi rotasi, selanjutnya akan terbangkit daya listrik di rotor. Daya listrik di motor dapat diperoleh dengan mengetahui arus yang mengalir di rotor. SEIG untuk beban satu fasa memiliki komponen urutan positif dan urutan negatif, dengan demikian akan terdapat dua jenis arus di rotor yaitu arus rotor urutan positif dan arus rotor urutan negatif. Dengan menganalisis rangkaian ekuivalen SEIG untuk beban satu fasa, maka arus urutan positif dan negatif yang mengalir di rotor dapat diperoleh dengan persamaan (3.27) dan (3.28).

$$I_r^+ = \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R_r'}{F - \delta} + jX_r'} I_{ap} \quad (3.27)$$

$$I_r^- = - \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R_r'}{F + \delta} + jX_r'} I_{an} \quad (3.28)$$

Setelah memperoleh arus urutan positif dan negatif di rotor, maka daya input listrik di rotor dapat dihitung menggunakan persamaan (3.29).

$$P_{in} = P_{input}^+ + P_{input}^- \quad (3.29)$$

$$P_{in} = 3I_r^+ \frac{R_r'}{F - \delta} + 3I_r^- \frac{R_r'}{F + \delta}$$

Dengan melakukan penjumlahan antara daya input listrik di rotor dengan seluruh rugi-rugi pada SEIG maka efisiensi dari SEIG dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (3.30).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{FW} + P_{RCL} + P_{core} + P_{SCL}} \quad (3.30)$$

Pada penelitian ini dilakukan pendekatan dengan menjumlahkan daya rugi *friction & windage*, dan daya rugi inti menjadi rugi rotasi. Rugi rotasi ini diwakili dengan nilai R_{FWC} yang dapat dihitung menggunakan data pengujian. Dari hasil pengujian diperoleh nilai R_{FWC} yaitu $402,5\Omega$. Dengan nilai R_{FWC} ini, maka daya rugi rotasi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (3.31) dimana nilai E_g diperoleh menggunakan persamaan (3.18).

$$P_{rot} = \frac{E_g^2}{R_{FWC}} \quad (3.31)$$

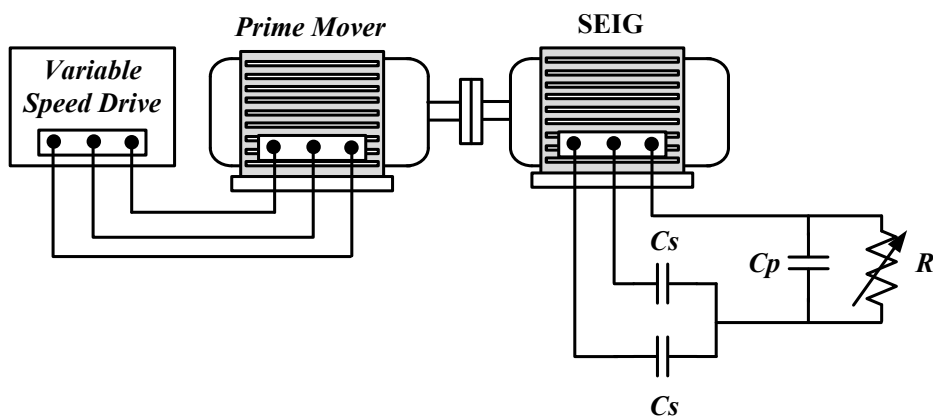
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{rot}} \quad (3.32)$$

Rugi tembaga rotor telah termasuk dalam pemodelan rangkaian ekuivalen SEIG untuk beban satu fasa sehingga rugi tembaga rotor tidak perlu dihitung kembali. Dengan demikian efisiensi dari SEIG dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (3.32).

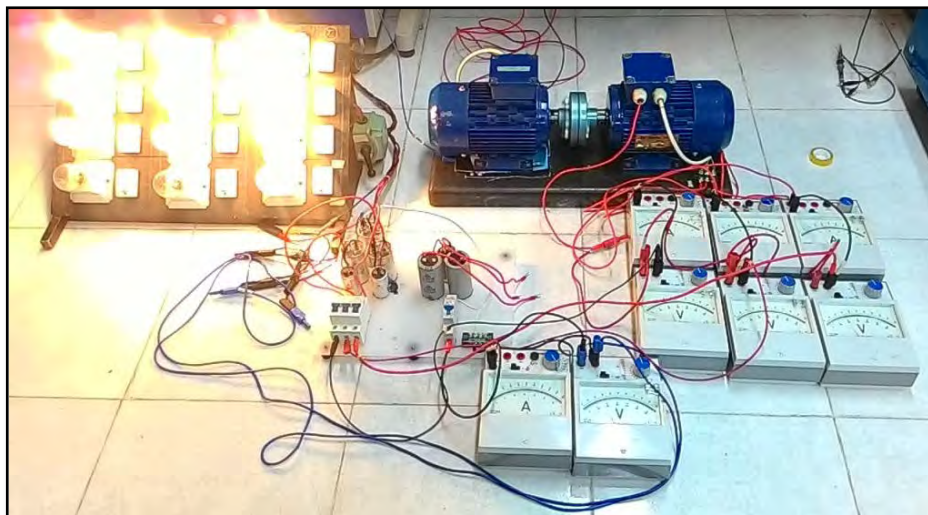
BAB 4

ANALISIS SIMULASI DAN HASIL EKSPERIMEN

Simulasi dan eksperimen dilakukan untuk menganalisis kinerja SEIG untuk beban satu fasa. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan mesin induksi dengan rating yang telah disebutkan pada bab sebelumnya. Sementara itu simulasi dilakukan dengan menggunakan parameter yang sama.



Gambar 4.1 Skema Eksperimen SEIG untuk Beban Satu Fasa



Gambar 4.2 Eksperimen SEIG untuk Beban Satu Fasa

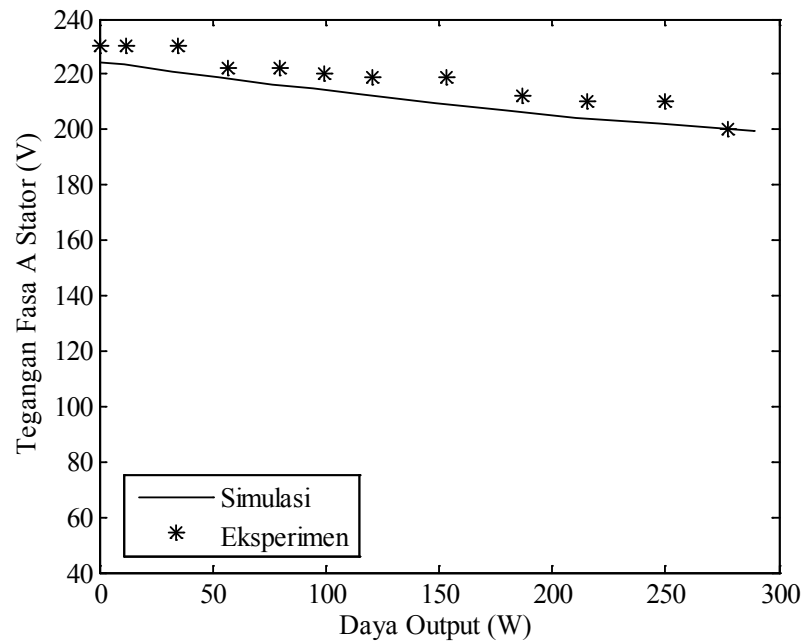
Pada penelitian ini, kecepatan dari SEIG diasumsikan konstan yaitu 1500 rpm dengan beban resistif murni. Selama eksperimen, kecepatan dijaga konstan dengan bantuan *Variable Speed Drive* (VSD) dan beban yang digunakan adalah lampu pijar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. dan 4.2. Pada bab ini akan dianalisis performa SEIG untuk beban satu fasa sebelum dan sesudah dilakukan optimisasi terhadap nilai C_p dan C_s . Hasil simulasi dan eksperimen dari kedua kondisi tersebut akan dibandingkan sehingga dapat terlihat tingkat keberhasilan dari metode yang diajukan pada penelitian ini.

4.1 Performa SEIG Sebelum Optimisasi C_s dan C_p

Pada kondisi sebelum optimisasi, dipilih nilai C_s dan C_p yang sama yaitu masing-masing $20\mu F$. Nilai kapasitor $20\mu F$ dipilih dengan asumsi bahwa nilai kapasitor minimum yang dibutuhkan oleh SEIG adalah $\sim 18,76\mu F$ per fasa. Nilai ini diperoleh dengan perhitungan yang telah dijabarkan pada bab 2. Nilai kapasitor yang dipilih selanjutnya digunakan untuk melihat performa SEIG pada simulasi dan eksperimen. Simulasi dan eksperimen dilakukan mulai dari kondisi tanpa beban hingga kondisi berbeban. Pada kondisi berbeban, beban dinaikkan secara bertahap hingga arus pada belitan stator mendekati batas I_{max} yaitu 2,1 A. Beban maksimum dari SEIG pada kondisi sebelum optimisasi adalah 277,4W atau setara dengan 36,98%.

4.1.1 Kondisi Tegangan Fasa pada Belitan Stator Sebelum Optimisasi

Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari tegangan fasa a (V_a) ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Dapat dilihat bahwa dengan penambahan beban V_a mengalami penurunan. Ketika membandingkan hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa *error* terbesar adalah 4,365% dengan selisih tegangan antara simulasi dan eksperimen $\pm 9V$. Data perbandingan hasil simulasi dan eksperimen V_a secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.1.

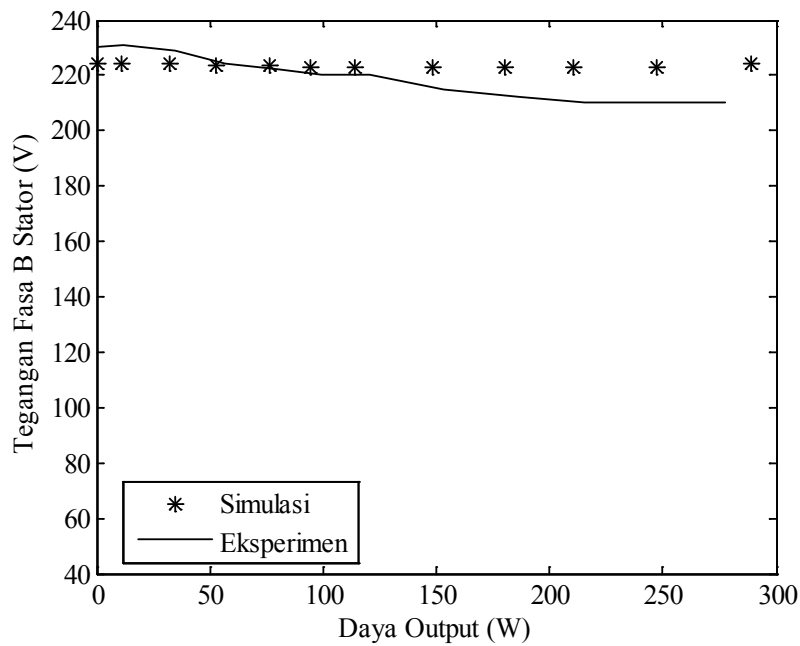


Gambar 4.3 Variasi V_a Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_a Sebelum Optimisasi

| P (W) | Eksperimen V_a (V) | Simulasi V_a (V) | error (%) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 230 | 224,466 | 2,406 |
| 11,5 | 230 | 223,344 | 2,894 |
| 34,35 | 230 | 221,078 | 3,879 |
| 57 | 222 | 218,900 | 1,396 |
| 79,92 | 222 | 216,458 | 2,496 |
| 99,45 | 220 | 214,632 | 2,440 |
| 120,45 | 219 | 212,674 | 2,889 |
| 153,36 | 219 | 209,440 | 4,365 |
| 186,9 | 212 | 206,712 | 2,494 |
| 215,25 | 210 | 204,358 | 2,687 |
| 250 | 210 | 201,960 | 3,829 |
| 277,4 | 200 | 199,804 | 0,098 |

Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari tegangan fasa b (V_b) ditunjukkan oleh Gambar 4.4. Ketika membandingkan hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa error terbesar adalah 6,721% dengan selisih tegangan antara simulasi dan eksperimen $\pm 14V$. Data perbandingan hasil simulasi dan eksperimen V_b secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.2.

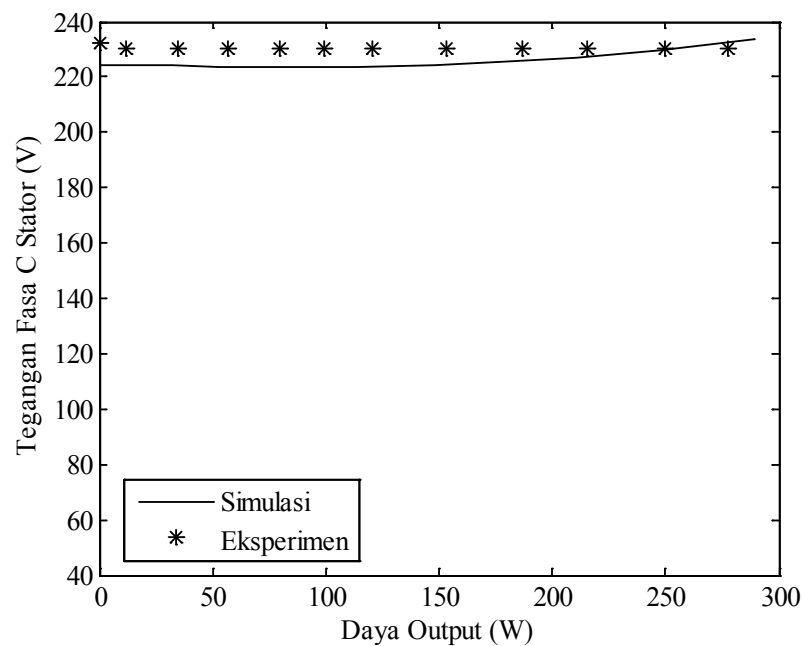


Gambar 4.4 Variasi V_b Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_b Sebelum Optimisasi

| P (W) | Eksperimen V_b (V) | Simulasi V_b (V) | error (%) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 230 | 224,488 | 2,397 |
| 11,5 | 231 | 224,312 | 2,895 |
| 34,35 | 229 | 223,960 | 2,201 |
| 57 | 224 | 223,630 | 0,165 |
| 79,92 | 222 | 223,300 | 0,586 |
| 99,45 | 220 | 223,080 | 1,400 |
| 120,45 | 220 | 222,860 | 1,300 |
| 153,36 | 215 | 222,640 | 3,553 |
| 186,9 | 212 | 222,618 | 5,008 |
| 215,25 | 210 | 222,772 | 6,082 |
| 250 | 210 | 223,212 | 6,291 |
| 277,4 | 210 | 224,114 | 6,721 |

Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari tegangan fasa c (V_c) ditunjukkan oleh Gambar 4.5. Ketika membandingkan hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa error terbesar adalah 3,238% dengan selisih tegangan antara simulasi dan eksperimen $\pm 8,4V$. Data perbandingan hasil simulasi dan eksperimen V_c secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.3.



Gambar 4.5 Variasi V_c Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_c Sebelum Optimisasi

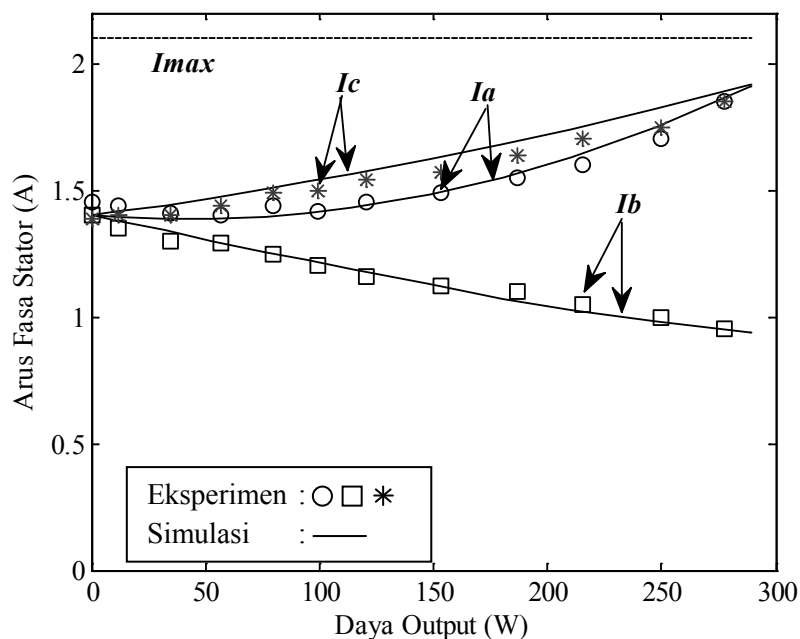
| P (W) | Eksperimen V_c (V) | Simulasi V_c (V) | error (%) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 232 | 224,488 | 3,238 |
| 11,5 | 230 | 224,312 | 2,473 |
| 34,35 | 230 | 223,982 | 2,617 |
| 57 | 230 | 223,784 | 2,703 |
| 79,92 | 230 | 223,696 | 2,741 |
| 99,45 | 230 | 223,740 | 2,722 |
| 120,45 | 230 | 223,938 | 2,636 |
| 153,36 | 230 | 224,598 | 2,349 |
| 186,9 | 230 | 225,676 | 1,880 |
| 215,25 | 230 | 227,194 | 1,220 |
| 250 | 230 | 229,658 | 0,149 |
| 277,4 | 230 | 233,442 | 1,497 |

Dari perbandingan hasil simulasi dan eksperimen secara keseluruhan terlihat bahwa terdapat *error* antara hasil simulasi dan eksperimen. Namun *error* antara hasil simulasi dan eksperimen relatif kecil. Perbedaan hasil eksperimen dan simulasi ini dapat dipengaruhi tingkat akurasi alat ukur serta penentuan penentuan parameter mesin yang kurang presisi.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan beban menyebabkan penurunan tegangan pada belitan stator. Selain itu akibat pengoperasian SEIG untuk beban satu fasa, terjadi kondisi tak seimbang pada belitan stator. Hal ini terlihat dari perbedaan nilai tegangan yang terukur pada tiap belitan stator. Kondisi ini juga terlihat pada hasil simulasi. Dari ketiga belitan, nilai tegangan terendah terjadi pada fasa *a*. Hal ini disebabkan fasa *a* merupakan fasa yang langsung terkoneksi dengan beban, sehingga kenaikan beban akan sangat mempengaruhi fasa *a* dibandingkan dengan dua fasa lainnya.

4.1.2 Kondisi Arus Fasa pada Belitan Stator Sebelum Optimisasi

Seperti pada tegangan fasa stator, kondisi tak seimbang juga terjadi pada arus fasa stator. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Variasi Arus Fasa Stator terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi

Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa kenaikan beban akan menyebabkan kondisi tak seimbang pada arus fasa stator semakin meningkat. Arus pada fasa *a* dan *c* meningkat seiring kenaikan beban, namun sebaliknya arus fasa *b* semakin menurun dengan kenaikan beban. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen

menunjukkan bahwa terdapat *error* yang relatif kecil. *Error* paling besar adalah 3,908% yang terjadi pada fasa *c* dimana terdapat selisih 0,068A antara hasil simulasi dan eksperimen. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa saat kondisi beban 277,4W arus pada tiap fasa masih berada dibawah nilai I_{max} yaitu nilai I_a , I_b dan I_c masing-masing adalah 1,85 A, 0,95 dan 1,85A .

Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_a Sebelum Optimisasi

| P (W) | Eksperimen I_a (A) | Simulasi I_a (A) | error (%) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 1,45 | 1,401 | 3,386 |
| 11,5 | 1,44 | 1,395 | 3,108 |
| 34,35 | 1,41 | 1,388 | 1,538 |
| 57 | 1,4 | 1,388 | 0,865 |
| 79,92 | 1,44 | 1,396 | 3,050 |
| 99,45 | 1,42 | 1,408 | 0,812 |
| 120,45 | 1,45 | 1,429 | 1,459 |
| 153,36 | 1,49 | 1,481 | 0,623 |
| 186,9 | 1,55 | 1,547 | 0,175 |
| 215,25 | 1,6 | 1,629 | 1,784 |
| 250 | 1,7 | 1,746 | 2,715 |
| 277,4 | 1,85 | 1,909 | 3,195 |

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_b Sebelum Optimisasi

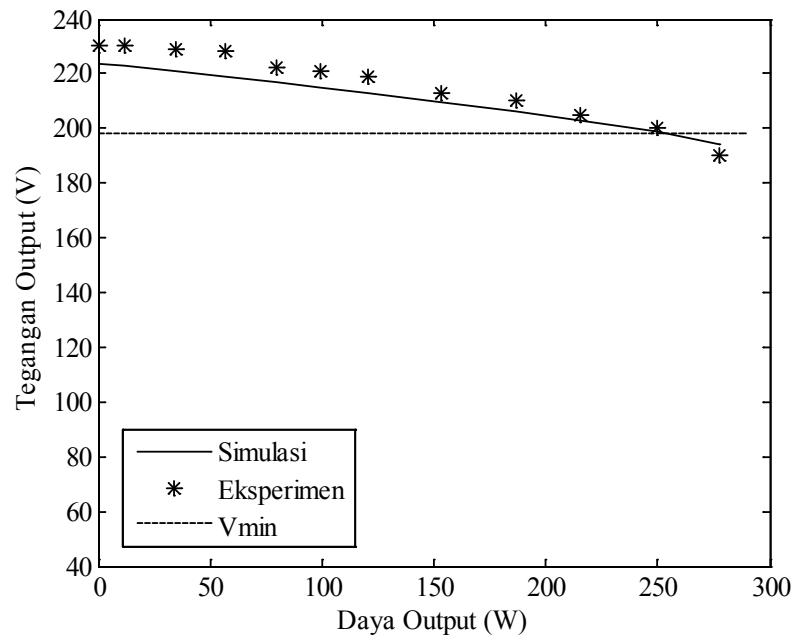
| P (W) | Eksperimen I_b (A) | Simulasi I_b (A) | error (%) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 1,4 | 1,400 | 0,020 |
| 11,5 | 1,35 | 1,381 | 2,262 |
| 34,35 | 1,3 | 1,340 | 3,094 |
| 57 | 1,29 | 1,301 | 0,849 |
| 79,92 | 1,25 | 1,257 | 0,531 |
| 99,45 | 1,2 | 1,223 | 1,955 |
| 120,45 | 1,16 | 1,187 | 2,357 |
| 153,36 | 1,12 | 1,127 | 0,594 |
| 186,9 | 1,1 | 1,074 | 2,369 |
| 215,25 | 1,05 | 1,028 | 2,140 |
| 250 | 1 | 0,979 | 2,056 |
| 277,4 | 0,95 | 0,937 | 1,344 |

Tabel 4.6 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_c Sebelum Optimisasi

| P (W) | Eksperimen I_c (A) | Simulasi I_c (A) | error (%) |
|--------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 1,39 | 1,402 | 0,860 |
| 11,5 | 1,4 | 1,415 | 1,040 |
| 34,35 | 1,4 | 1,442 | 2,990 |
| 57 | 1,44 | 1,470 | 2,083 |
| 79,92 | 1,49 | 1,504 | 0,941 |
| 99,45 | 1,5 | 1,531 | 2,088 |
| 120,45 | 1,54 | 1,563 | 1,482 |
| 153,36 | 1,57 | 1,621 | 3,275 |
| 186,9 | 1,64 | 1,680 | 2,439 |
| 215,25 | 1,7 | 1,740 | 2,381 |
| 250 | 1,75 | 1,818 | 3,908 |
| 277,4 | 1,85 | 1,916 | 3,581 |

4.1.3 Kondisi Tegangan Output Sebelum Optimisasi

Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, bahwa tegangan output dari SEIG diharapkan paling minimum berada pada nilai 198V , atau 10% dari rating mesin.



Gambar 4.7 Variasi Tegangan Output terhadap Daya Output Sebelum Optmisasi

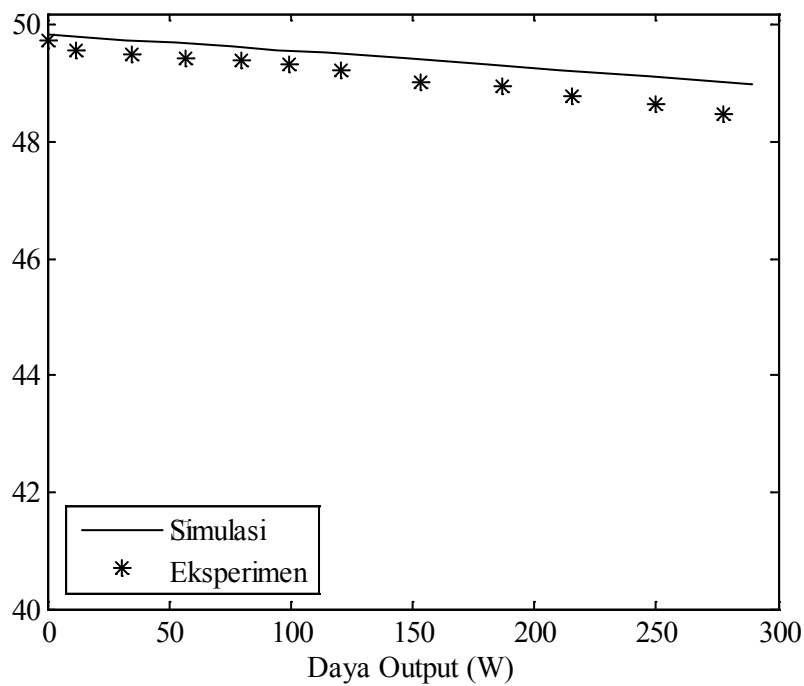
Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan beban akan menyebabkan penurunan pada tegangan output dimana pada kondisi beban 277,4W nilai tegangan output telah melewati batas minimum tegangan yaitu 190V pada eksperimen dan 193,9V pada simulasi. Dari Tabel 4.7 terlihat bahwa nilai tegangan output masih berada pada batas yang ditentukan ketika pembebanan 250W atau 33,33% dari rating mesin.

Tabel 4.7 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_L Sebelum Optimisasi

| P (W) | Eksperimen V_L (V) | Simulasi V_L (V) | <i>error</i> (%) |
|--------|----------------------|--------------------|------------------|
| 0 | 230 | 223,850 | 2,674 |
| 11,5 | 230 | 222,926 | 3,076 |
| 34,35 | 229 | 220,968 | 3,507 |
| 57 | 228 | 219,032 | 3,933 |
| 79,92 | 222 | 216,744 | 2,368 |
| 99,45 | 221 | 214,984 | 2,722 |
| 120,45 | 219 | 213,004 | 2,738 |
| 153,36 | 213 | 209,462 | 1,661 |
| 186,9 | 210 | 206,140 | 1,838 |
| 215,25 | 205 | 202,840 | 1,054 |
| 250 | 200 | 198,792 | 0,604 |
| 277,4 | 190 | 193,908 | 2,057 |

4.1.4 Kondisi Frekuensi Output Sebelum Optimisasi

Selain nilai tegangan, frekuensi juga merupakan parameter yang perlu dijaga agar tidak melebihi batas yang ditentukan. Diharapkan frekuensi output dari SEIG untuk beban satu fasa masih berada pada batas yang ditentukan yaitu $\pm 5\%$ dari rating mesin. Grafik perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari frekuensi output dapat dilihat pada Gambar 4.8. Terlihat bahwa kenaikan beban akan menyebabkan penurunan pada frekuensi output dari SEIG, hal ini ditunjukkan baik dari hasil simulasi maupun eksperimen. Pada kondisi beban 277,4W nilai frekuensi output dari SEIG masih berada pada batas yang ditentukan. Sementara itu terjadi *error* antara hasil simulasi dan eksperimen, dengan nilai *error* paling besar adalah 1,083%.



Gambar 4.8 Variasi Frekuensi Output terhadap Daya Output Sebelum Optimisasi

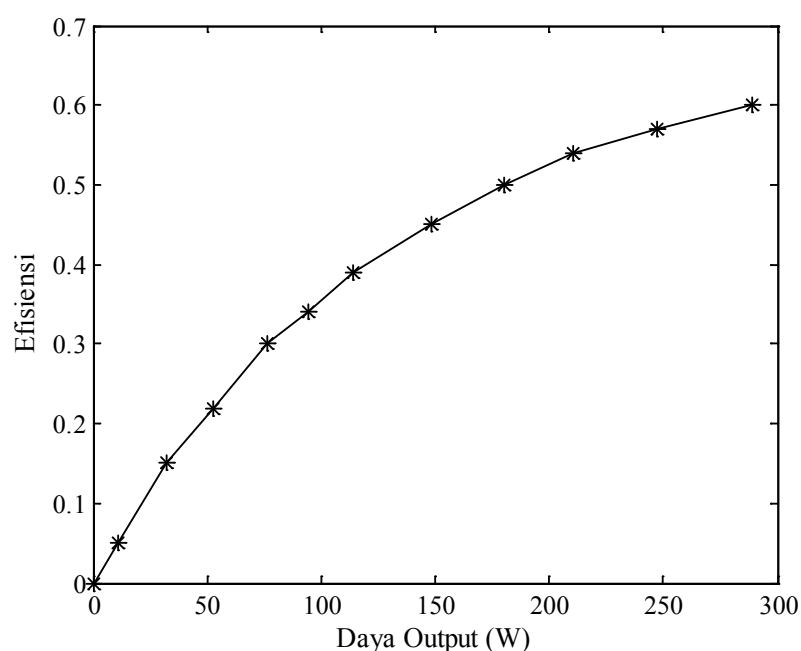
Tabel 4.8 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen F Sebelum Optimisasi

| P (W) | Eksperimen F (Hz) | Simulasi F (Hz) | error (%) |
|--------|-------------------|-----------------|-----------|
| 0 | 49,75 | 49,83 | 0,161 |
| 11,5 | 49,58 | 49,805 | 0,454 |
| 34,35 | 49,51 | 49,75 | 0,485 |
| 57 | 49,44 | 49,695 | 0,516 |
| 79,92 | 49,41 | 49,63 | 0,445 |
| 99,45 | 49,33 | 49,58 | 0,507 |
| 120,45 | 49,23 | 49,525 | 0,599 |
| 153,36 | 49,04 | 49,425 | 0,785 |
| 186,9 | 48,97 | 49,33 | 0,735 |
| 215,25 | 48,78 | 49,24 | 0,943 |
| 250 | 48,65 | 49,125 | 0,976 |
| 277,4 | 48,47 | 48,995 | 1,083 |

4.1.5 Efisiensi pada SEIG untuk Beban Satu Fasa Sebelum Optimisasi

Efisiensi SEIG untuk beban satu fasa yang akan ditampilkan pada penelitian ini hanya merupakan efisiensi SEIG pada simulasi. Efisiensi pada eksperimen tidak dapat ditampilkan karena keterbatasan dalam pelaksanaan

eksperimen. Nilai efisiensi SEIG diperoleh dengan persamaan (3.32) yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Adapun variasi efisiensi terhadap penambahan beban dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan data yang lebih terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.9. Hasil simulasi menunjukkan efisiensi dari SEIG meningkat seiring dengan kenaikan beban.



Gambar 4.9 Efisiensi pada SEIG dengan Perubahan Beban Sebelum Optimisasi

Tabel 4.9 Efisiensi SEIG untuk Beban Satu Fasa Sebelum Optimisasi

| P_o (W) | P_{in} (W) | E_g (V) | P_{rot} (W) | η |
|-----------|--------------|-----------|---------------|--------|
| 0,00 | -66,30 | 203,43 | 124,49 | 0 |
| 10,81 | -76,28 | 203,19 | 123,47 | 0,05 |
| 31,97 | -97,02 | 202,73 | 121,31 | 0,15 |
| 52,62 | -117,53 | 202,31 | 119,19 | 0,22 |
| 76,18 | -141,37 | 201,87 | 116,72 | 0,30 |
| 94,11 | -159,85 | 201,59 | 114,83 | 0,34 |
| 113,93 | -180,60 | 201,32 | 112,72 | 0,39 |
| 148,30 | -217,56 | 200,99 | 109,01 | 0,45 |
| 180,09 | -252,90 | 200,88 | 105,57 | 0,50 |
| 210,67 | -288,20 | 200,97 | 102,22 | 0,54 |
| 247,03 | -331,99 | 201,34 | 98,18 | 0,57 |
| 288,98 | -385,45 | 202,18 | 93,42 | 0,60 |

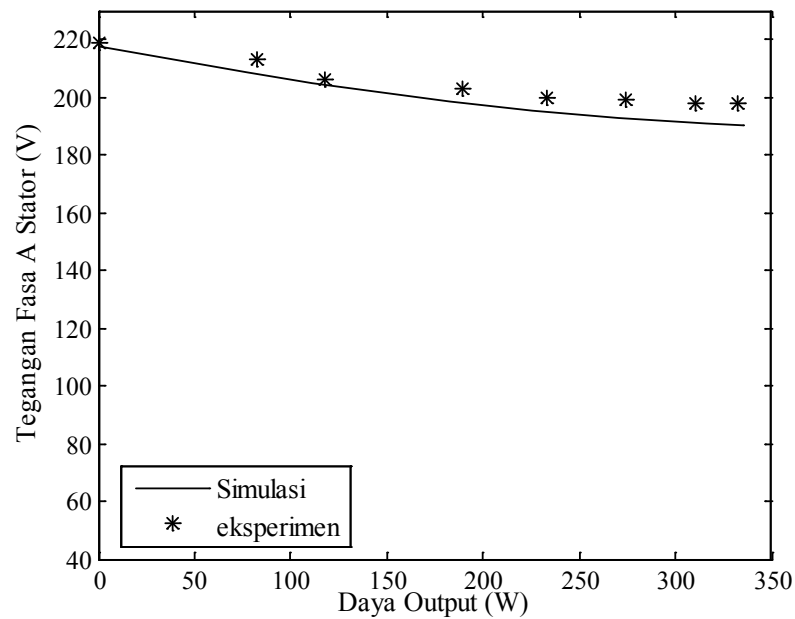
4.2 Performa SEIG Setelah Optimisasi C_p dan C_s

Pada bagian ini akan dilakukan analisa performa dari SEIG setelah dilakukan optimisasi terhadap C_p dan C_s . Optimisasi dilakukan dengan asumsi SEIG akan dibebani hingga 40% dari rating mesin, dan tegangan minimum dari tegangan output adalah 198V. Dengan nilai daya output dan tegangan output tersebut maka dapat diperoleh nilai R_L yang akan digunakan selama optimisasi.

Dari hasil optimisasi PSO diperoleh nilai C_p dan C_s yang optimal masing-masing adalah $15,14\mu F$ dan $20,68\mu F$. Namun karena keterbatasan kapasitas kapasitor di pasaran, maka dipilih nilai C_p $15\mu F$ sementara C_s bernilai $21\mu F$. Nilai kapasitor inilah yang digunakan pada eksperimen dan simulasi. Sama halnya dengan analisis SEIG sebelumnya, pada analisis performa SEIG setelah optimisasi ini dilakukan dengan melakukan variasi terhadap beban. Selanjutnya akan dilihat pengaruh perubahan beban terhadap tegangan fasa, arus fasa stator, tegangan dan frekuensi output dari SEIG. Dengan optimisasi kapasitor yang dilakukan, SEIG mampu beroperasi hingga 332,64W atau 44,35% dari rating mesin.

4.2.1 Kondisi Tegangan Fasa pada Belitan Stator Setelah Optimisasi

Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari tegangan fasa a (V_a) ditunjukkan oleh Gambar 4.10. Dapat dilihat bahwa dengan penambahan beban V_a mengalami penurunan. Ketika membandingkan hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa *error* terbesar adalah 3,822% dengan selisih tegangan antara simulasi dan eksperimen $\pm 8,4V$. Data perbandingan hasil simulasi dan eksperimen V_a secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.10.

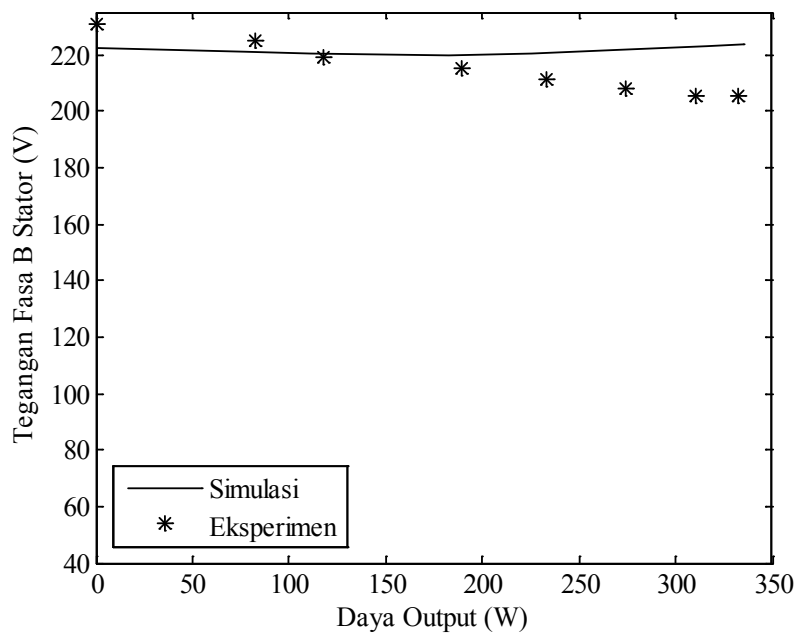


Gambar 4.10 Variasi V_a Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi

Tabel 4.10 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_a Setelah Optimisasi

| P (W) | Eksperimen V_a (V) | Simulasi V_a (V) | error (%) |
|---------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 219 | 217,448 | 0,709 |
| 82,368 | 213 | 208,846 | 1,950 |
| 117,935 | 206 | 205,216 | 0,381 |
| 189,435 | 203 | 198,572 | 2,181 |
| 233,26 | 200 | 195,338 | 2,331 |
| 274,275 | 199 | 192,698 | 3,167 |
| 310,44 | 198 | 190,916 | 3,578 |
| 332,64 | 198 | 190,432 | 3,822 |

Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari tegangan fasa b (V_b) ditunjukkan oleh Gambar 4.11. Ketika membandingkan hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa error terbesar adalah 9,08% dengan selisih tegangan antara simulasi dan eksperimen $\pm 28V$. Data perbandingan hasil simulasi dan eksperimen V_b secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.11.



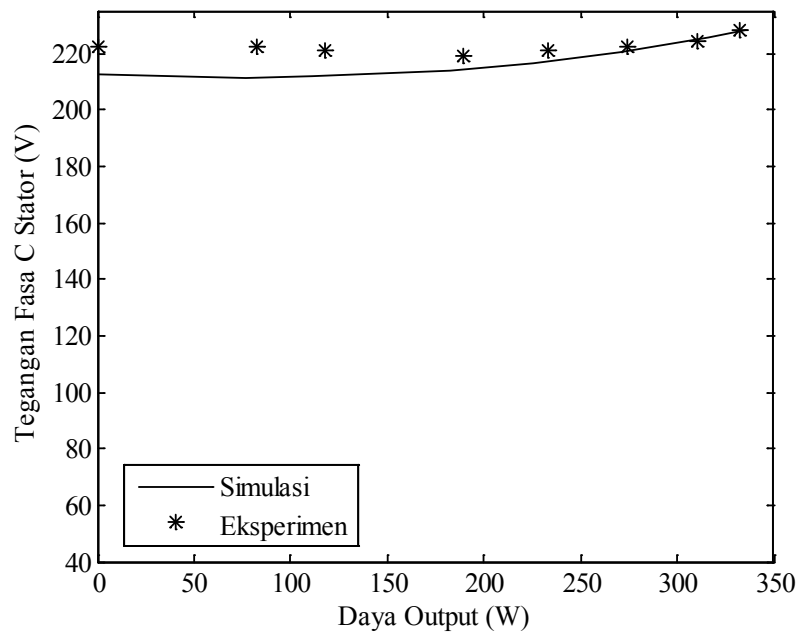
Gambar 4.11 Variasi V_b Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi

Tabel 4.11 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_b Setelah Optimisasi

| P (W) | Eksperimen V_b (V) | Simulasi V_b (V) | error (%) |
|---------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 231 | 222,508 | 3,676 |
| 82,368 | 225 | 220,836 | 1,851 |
| 117,935 | 219 | 220,308 | 0,597 |
| 189,435 | 215 | 219,978 | 2,315 |
| 233,26 | 211 | 220,396 | 4,453 |
| 274,275 | 208 | 221,342 | 6,414 |
| 310,44 | 205 | 222,86 | 8,712 |
| 332,64 | 205 | 223,63 | 9,088 |

5

Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari tegangan fasa c (V_c) ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Ketika membandingkan hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa error terbesar adalah 4,72% dengan selisih tegangan antara simulasi dan eksperimen $\pm 10,5V$. Data perbandingan hasil simulasi dan eksperimen V_c secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 4.12.

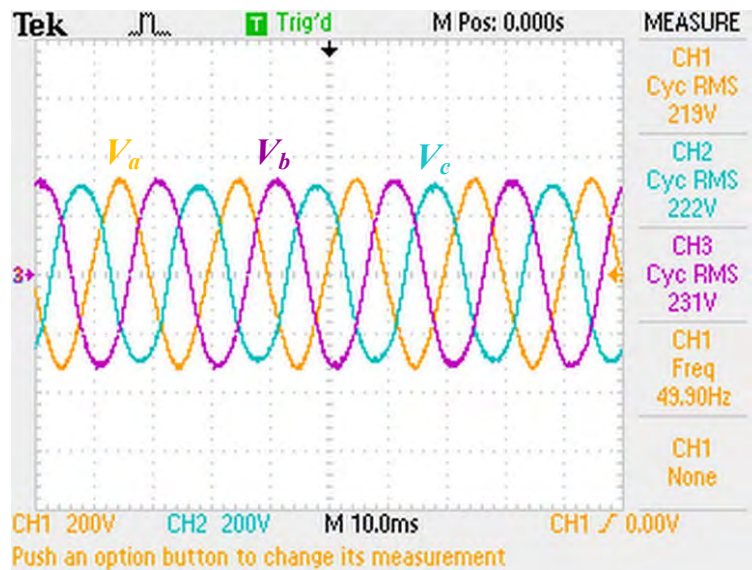


Gambar 4.12 Variasi V_c Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi

Tabel 4.12 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_c Setelah Optimisasi

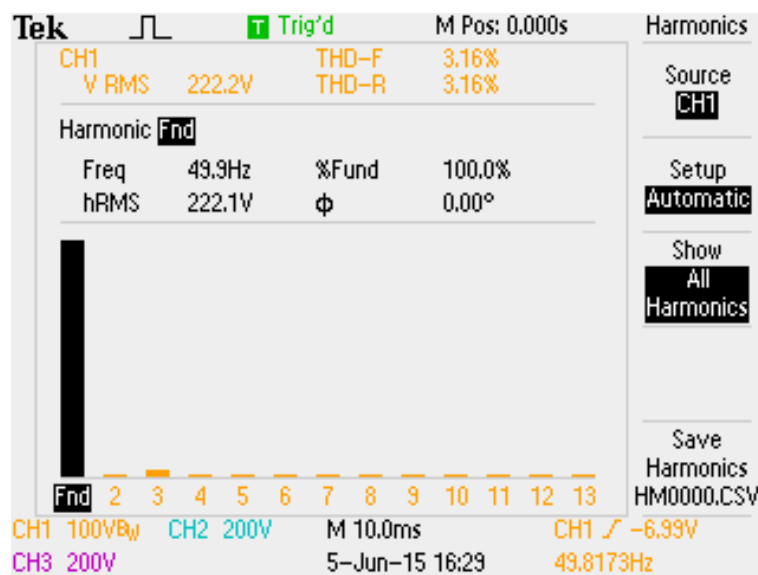
| P (W) | Eksperimen V_c (V) | Simulasi V_c (V) | error (%) |
|---------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 222 | 212,234 | 4,399 |
| 82,368 | 222 | 211,508 | 4,726 |
| 117,935 | 221 | 211,794 | 4,166 |
| 189,435 | 219 | 214,016 | 2,276 |
| 233,26 | 221 | 216,612 | 1,986 |
| 274,275 | 222 | 220,462 | 0,693 |
| 310,44 | 224 | 225,5 | 0,670 |
| 332,64 | 228 | 227,964 | 0,016 |

Selain dilakukan penggunaan alat ukur untuk pengukuran nilai tegangan dan arus dari SEIG, digunakan pula osiloskop untuk melihat kondisi tak seimbang pada belitan stator. Gelombang tegangan yang ditampilkan adalah saat kondisi operasi SEIG tanpa beban dan saat beban maksimum 332,64W. Gelombang tegangan stator ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan 4.17. CH1 merupakan gelombang V_a , CH2 menunjukkan gelombang V_c dan CH3 menunjukkan gelombang V_b .

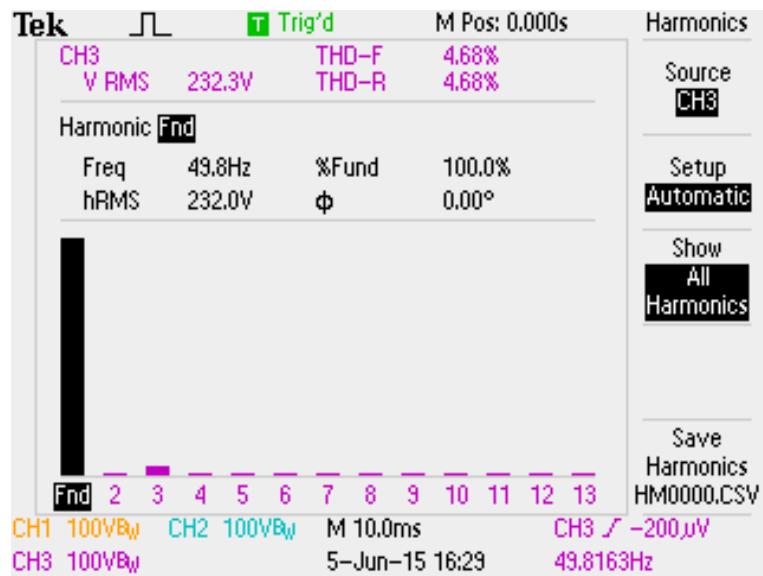


Gambar 4.13 Gelombang Tegangan Fasa Stator saat Tanpa Beban

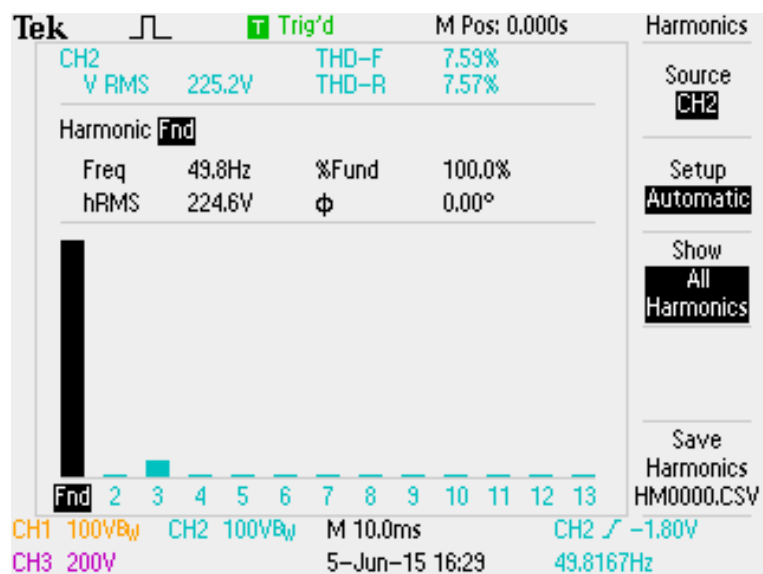
Dari Gambar 4.13 terlihat pada kondisi tanpa beban telah terjadi kondisi tak seimbang pada belitan stator. Hal ini terlihat dari puncak gelombang ketiga fasa yang berbeda serta ditunjukkan oleh hasil pengukuran pada osiloskop. Selanjutnya dilakukan pula pengamatan terhadap harmonisa yang timbul pada tegangan tiap fasa stator yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14 hingga 4.16.



Gambar 4.14 Harmonisa Tegangan Fasa *a* pada Kondisi Tanpa Beban

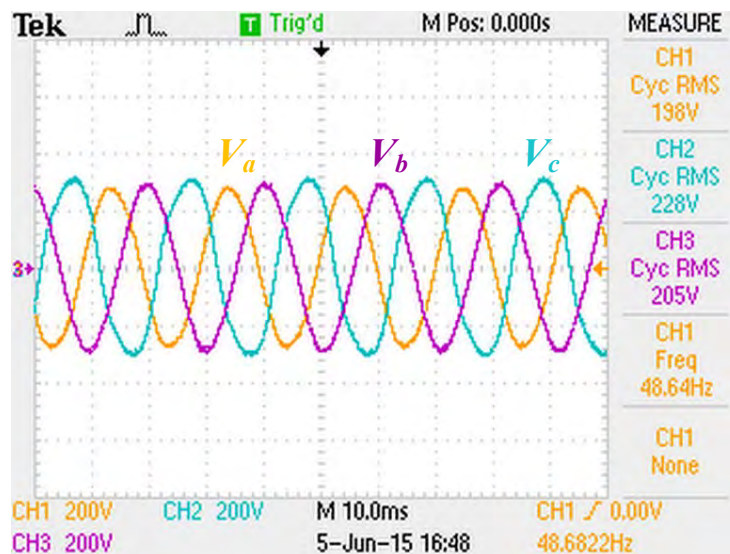


Gambar 4.15 Harmonisa Tegangan Fasa *b* pada Kondisi Tanpa Beban



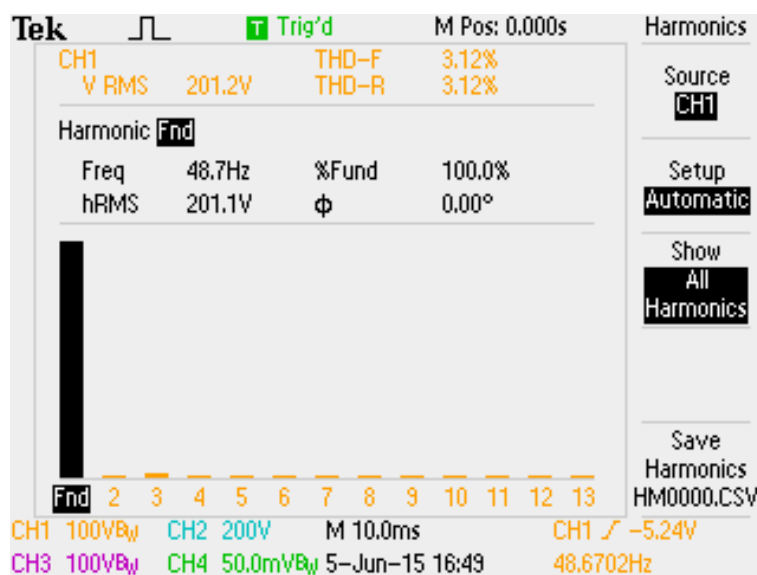
Gambar 4.16 Harmonisa Tegangan Fasa *c* pada Kondisi Tanpa Beban

Hasil pengamatan harmonisa pada gelombang tegangan tiap fasa stator menunjukkan bahwa harmonisa terbesar pada tegangan stator adalah harmonisa orde ke-3. Dimana nilai harmonisa terbesar terjadi pada gelombang V_c .

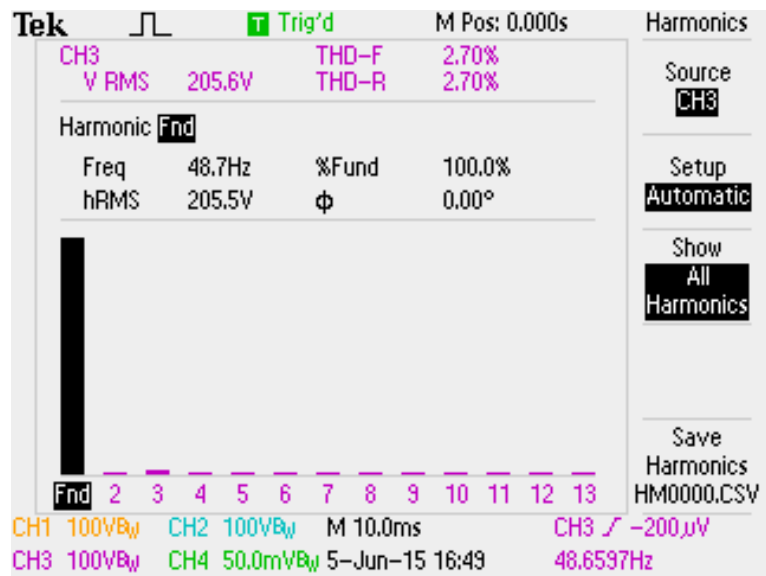


Gambar 4.17 Gelombang Tegangan Fasa Stator saat Beban Maksimum

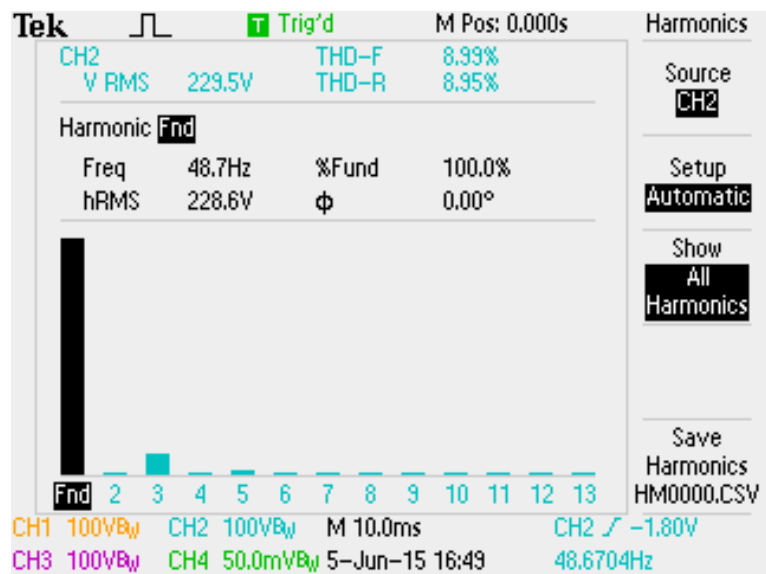
Pada kondisi beban maksimum tetap terjadi kondisi tak seimbang pada belitan stator. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai RMS V_a dan V_b dengan nilai V_a mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan V_b . Sementara itu nilai RMS dari V_c mengalami kenaikan dan memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan V_a dan V_b .



Gambar 4.18 Harmonisa Tegangan Fasa a pada Kondisi Beban Maksimum



Gambar 4.19 Harmonisa Tegangan Fasa *b* pada Kondisi Beban Maksimum



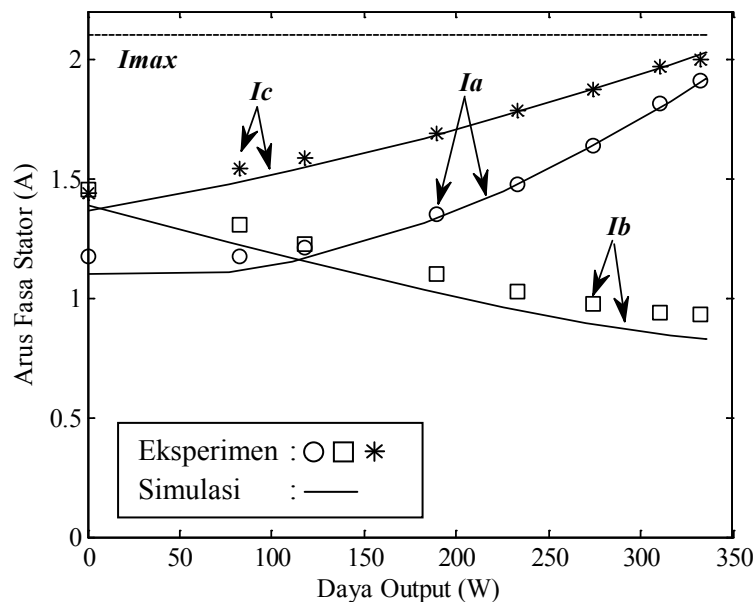
Gambar 4.20 Harmonisa Tegangan Fasa *c* pada Kondisi Beban Maksimum

Hasil pengamatan harmonisa pada kondisi beban maksimum menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai harmonisa pada V_a dan V_b . Hal ini ditunjukkan dengan %THD yang mengalami penurunan bila dibandingkan dengan %THD pada kondisi tanpa beban. Menurunnya %THD dari V_a dan V_b disebabkan oleh penurunan nilai V_a dan V_b pada kondisi beban maksimum, sehingga secara tidak langsung %THD juga akan mengalami penurunan. Sebaliknya %THD pada V_c akan mengalami kenaikan pada beban maksimum,

hal ini disebabkan karena nilai RMS dari V_c yang mengalami kenaikan saat beban maksimum.

4.2.2 Kondisi Arus Fasa pada Belitan Stator Setelah Optimisasi

Seperti telah dijelaskan, bahwa pada kondisi setelah optimisasi SEIG mampu beroperasi hingga 332,64W atau 44,35% dari rating mesin. Pada kondisi pembebanan 332,64 W ini arus I_a , I_b dan I_c masih berada pada nilai dibawah nilai I_{max} . Nilai I_a dan I_b mengalami kenaikan dengan penambahan beban, hingga pada beban 336,6W nilai I_a dan I_c masing-masing adalah 1,91 dan 2A. Sebaliknya nilai I_b mengalami penurunan hingga 0,93A saat beban 332,64W.



Gambar 4.21 Variasi Arus Fasa Stator terhadap Daya Output Setelah Optimisasi

Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_a Setelah Optimisasi

| P (W) | Eksperimen I_a (A) | Simulasi I_a (A) | error (%) |
|---------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 1,17 | 1,098 | 6,164 |
| 82,368 | 1,175 | 1,109 | 5,580 |
| 117,935 | 1,21 | 1,151 | 4,858 |
| 189,435 | 1,35 | 1,310 | 2,996 |
| 233,26 | 1,475 | 1,448 | 1,848 |
| 274,275 | 1,635 | 1,623 | 0,754 |
| 310,44 | 1,815 | 1,824 | 0,522 |
| 332,64 | 1,91 | 1,917 | 0,371 |

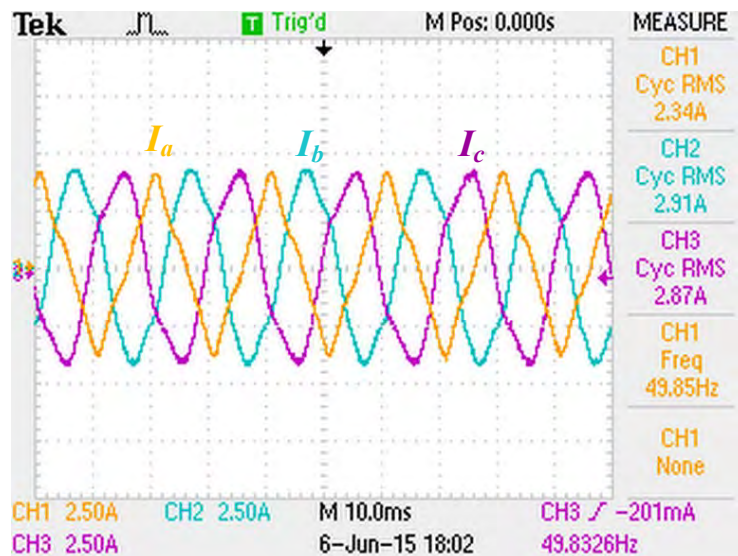
Tabel 4.14 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_b Setelah Optimisasi

| P (W) | Eksperimen I_b (A) | Simulasi I_b (A) | error (%) |
|--------------|--|--------------------------------------|------------------|
| 0 | 1,455 | 1,390 | 4,497 |
| 82,368 | 1,305 | 1,234 | 5,411 |
| 117,935 | 1,225 | 1,166 | 4,823 |
| 189,435 | 1,1 | 1,031 | 6,245 |
| 233,26 | 1,03 | 0,959 | 6,927 |
| 274,275 | 0,975 | 0,894 | 8,332 |
| 310,44 | 0,935 | 0,845 | 9,599 |
| 332,64 | 0,93 | 0,831 | 10,648 |

Tabel 4.15 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen I_c Setelah Optimisasi

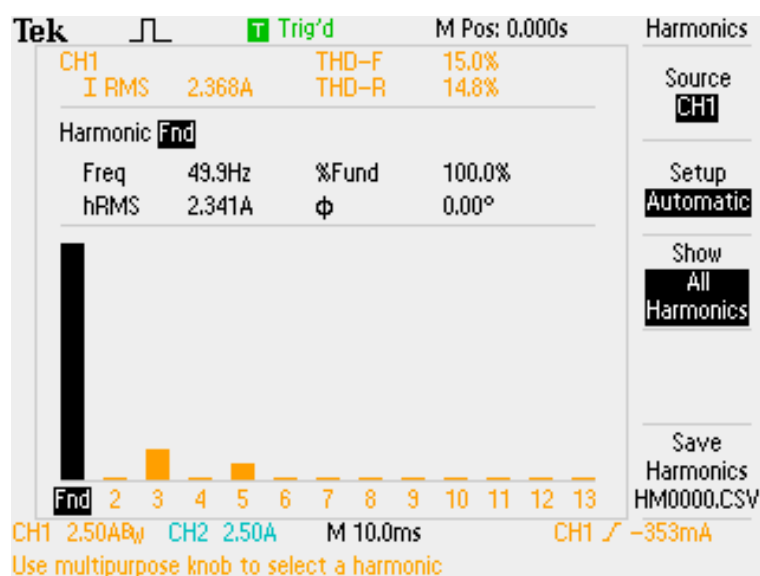
| P (W) | Eksperimen I_c (A) | Simulasi I_c (A) | error (%) |
|--------------|--|--------------------------------------|------------------|
| 0 | 1,435 | 1,363 | 4,995 |
| 82,368 | 1,545 | 1,477 | 4,379 |
| 117,935 | 1,585 | 1,535 | 3,148 |
| 189,435 | 1,69 | 1,669 | 1,263 |
| 233,26 | 1,785 | 1,759 | 1,435 |
| 274,275 | 1,875 | 1,863 | 0,656 |
| 310,44 | 1,97 | 1,975 | 0,246 |
| 332,64 | 2 | 2,025 | 1,231 |

Apabila dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen dari arus fasa stator terlihat bahwa terdapat *error*. *Error* terbesar terjadi pada arus fasa b yaitu 10,6% dengan selisih arus 0,1A. Saat melakukan eksperimen, dilakukan pengamatan terhadap gelombang arus fasa belitan stator. Hal ini bertujuan untuk melihat kondisi tak seimbang pada belitan stator ketika SEIG beroperasi untuk beban satu fasa. Gelombang arus fasa stator pada kondisi tanpa beban dapat dilihat pada Gambar 4.22. C H1 pada Gambar 4.22 merupakan gelombang I_a , CH2 menunjukkan gelombang I_b dan CH3 menunjukkan gelombang I_c . Pada pengamatan gelombang arus fasa stator digunakan *clamp meter* dengan rasio 400mV/A sementara itu pada osiloskop digunakan rasio 200 mV/A, dengan demikian nilai riil dari arus fasa stator adalah setengah dari nilai yang terukur pada osiloskop.

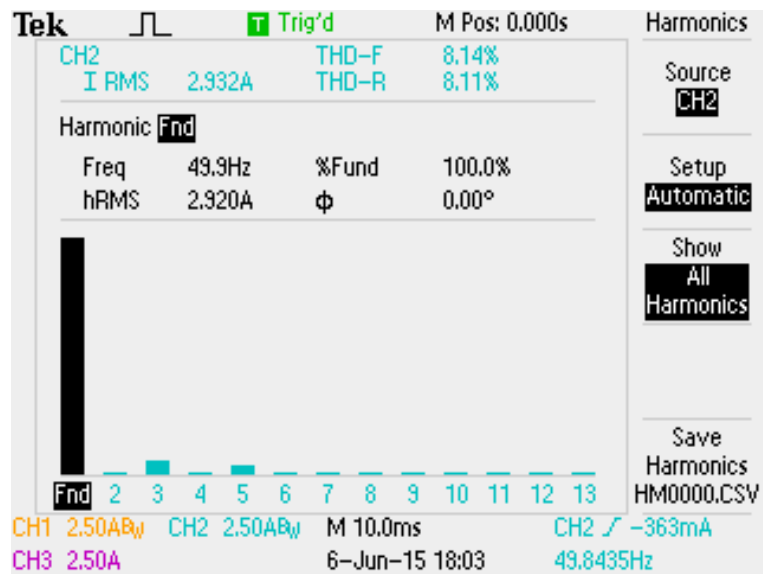


Gambar 4.22 Gelombang Arus Fasa Stator saat Tanpa Beban

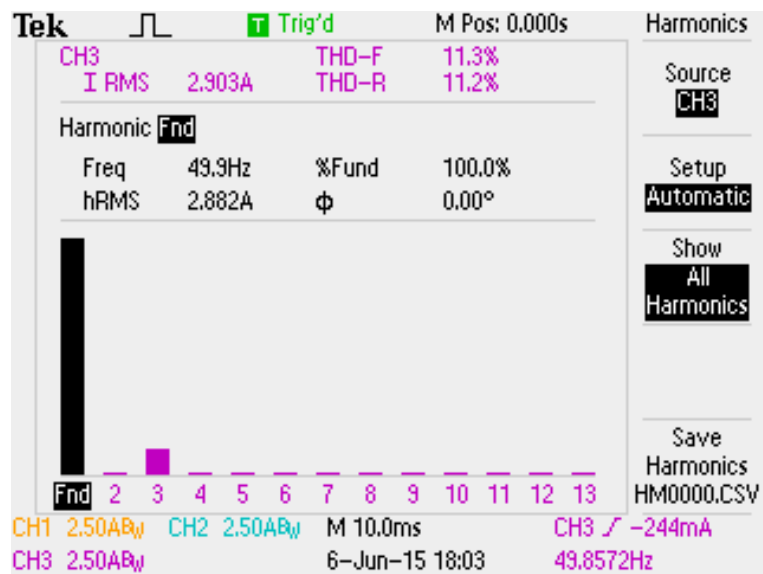
Pada Gambar 4.22 terlihat pada kondisi tanpa beban telah terjadi kondisi tak seimbang pada belitan stator. Hal ini terlihat dari nilai RMS yang terukur pada osiloskop dimana I_a memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dua fasa lainnya. Dari bentuk gelombang yang diperoleh terlihat bahwa terdapat distorsi pada gelombang arus stator. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat harmonisa pada arus fasa stator, dimana nilai harmonisa tiap fasa ditunjukkan oleh Gambar 4.23 hingga 4.25.



Gambar 4.23 Harmonisa Arus Stator Fasa a saat Tanpa Beban

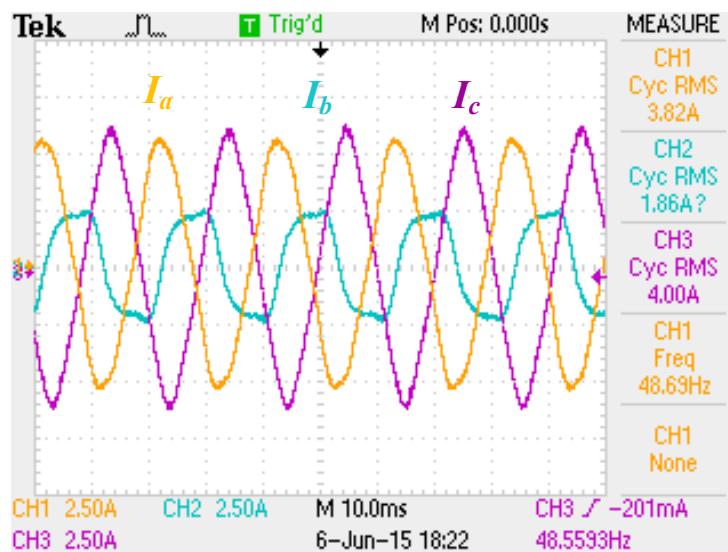


Gambar 4.24 Harmonisa Arus Stator Fasa *b* saat Tanpa Beban



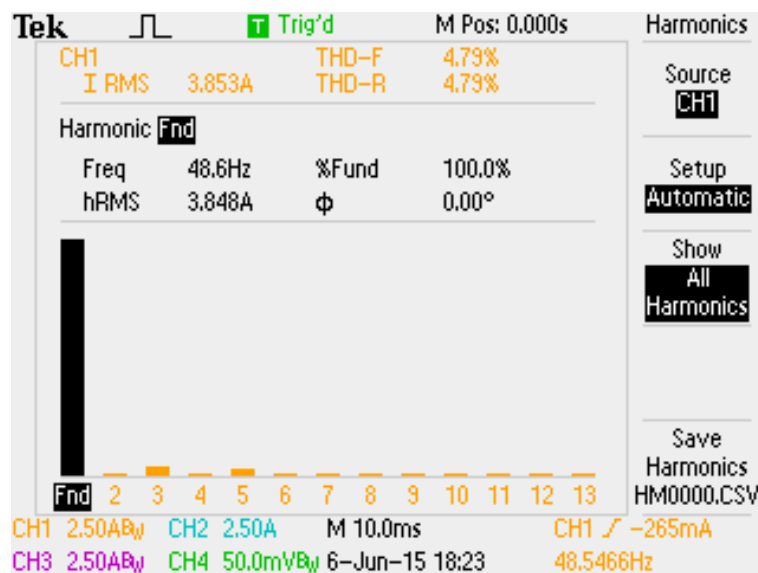
Gambar 4.25 Harmonisa Arus Stator Fasa *c* saat Tanpa Beban

Pada saat kondisi tanpa beban, harmonisa terbesar terdapat pada gelombang I_a dimana terdapat harmonisa ke-3 dan ke-5. Harmonisa orde ke-3 dan orde ke-5 juga muncul pada gelombang I_b , sementara itu pada gelombang I_c lebih didominasi oleh harmonisa orde ke-3.

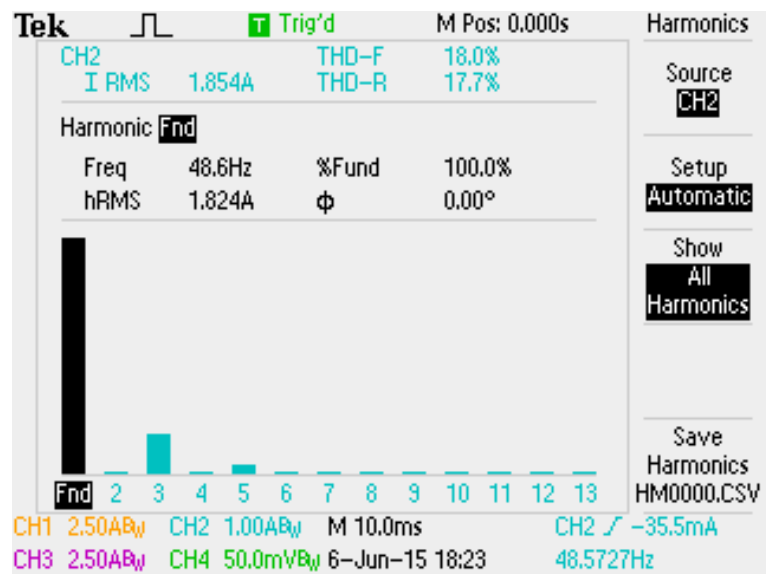


Gambar 4.26 Gelombang Arus Fasa Stator saat Beban Maksimum

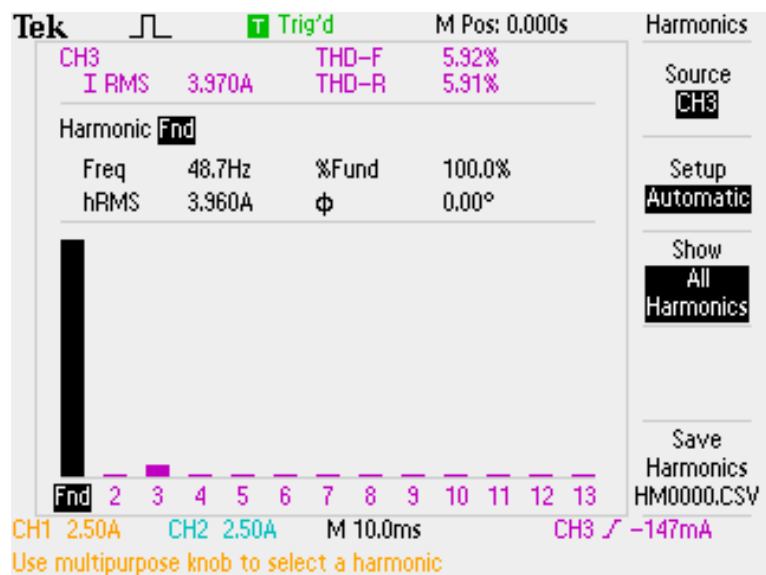
Pada kondisi beban maksimum yang ditunjukkan oleh Gambar 4.26, terlihat bahwa kondisi tak seimbang pada arus fasa stator semakin besar. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai I_a hingga 0,93A. Sementara itu I_b dan I_c mengalami kenaikan saat beban maksimum.



Gambar 4.27 Harmonisa Arus Stator Fasa a saat Beban Maksimum



Gambar 4.28 Harmonisa Arus Stator Fasa *b* saat Beban Maksimum

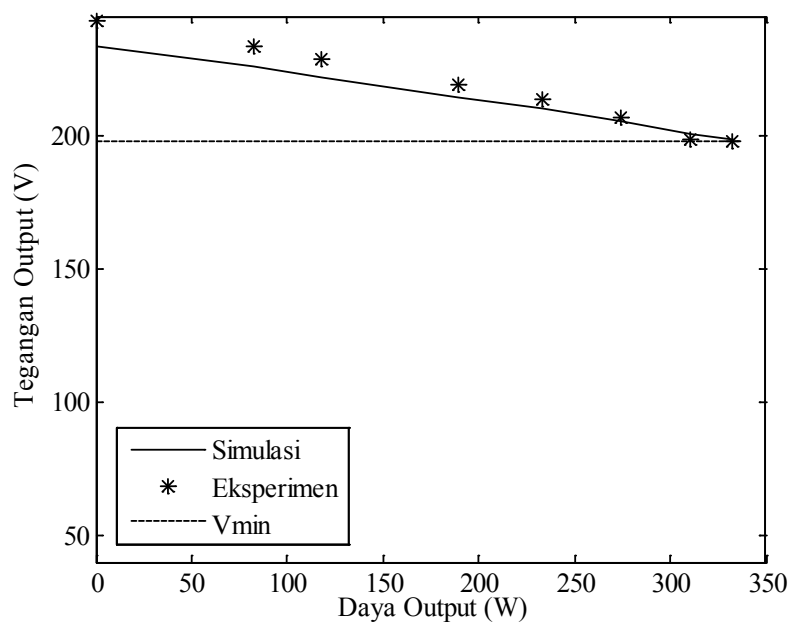


Gambar 4.29 Harmonisa Arus Stator Fasa *c* saat Beban Maksimum

Hasil pengamatan harmonisa arus fasa stator pada kondisi beban maksimum ditunjukkan oleh Gambar 4.27 hingga 4.29. Pada kondisi beban maksimum, harmonisa dari I_a dan I_c mengalami penurunan yang cukup besar, sementara itu sebaliknya terjadi kenaikan %THD pada I_b saat kondisi beban maksimum yaitu hingga 18%.

4.2.3 Kondisi Tegangan Output Setelah Optimisasi

Tegangan output dari SEIG akan menurun seiring bertambahnya beban. Hal ini ditunjukkan dari hasil simulasi dan eksperimen pada Gambar 4.30. Setelah dilakukan optimisasi pada nilai C_p dan C_s , pada beban 332,64W terlihat bahwa tegangan output dari SEIG masih berada pada batas yang ditentukan yaitu bernilai 198V. Data yang lebih terperinci dari variasi tegangan output terhadap penambahan beban dapat dilihat pada Tabel 4.16.

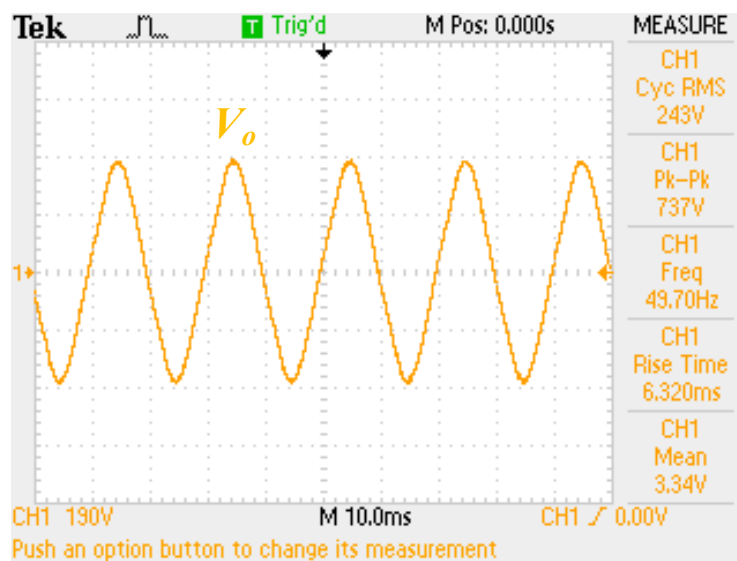


Gambar 4.30 Variasi Tegangan Output terhadap Daya Output Setelah Optimisasi

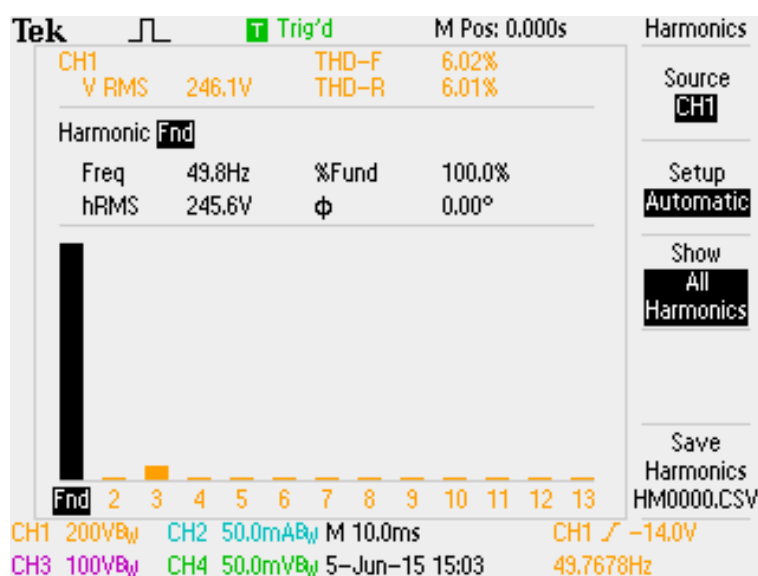
Tabel 4.16 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen V_L Setelah Optimisasi

| P (W) | Eksperimen V_L (V) | Simulasi V_L (V) | error (%) |
|---------|----------------------|--------------------|-----------|
| 0 | 243 | 233,838 | 3,770 |
| 82,368 | 234 | 225,94 | 3,444 |
| 117,935 | 229 | 222,31 | 2,921 |
| 189,435 | 219 | 214,808 | 1,914 |
| 233,26 | 214 | 210,298 | 1,730 |
| 274,275 | 207 | 205,546 | 0,702 |
| 310,44 | 199 | 200,75 | 0,879 |
| 332,64 | 198 | 198,66 | 0,333 |

Pada eksperimen dilakukan pengamatan terhadap gelombang tegangan output. Gelombang tegangan output yang ditampilkan adalah gelombang tegangan saat kondisi tanpa beban dan beban 332,64W. Dari Gambar 4.31 dan 4.33 terlihat bahwa terjadi penurunan pada tegangan output saat kondisi beban maksimum.

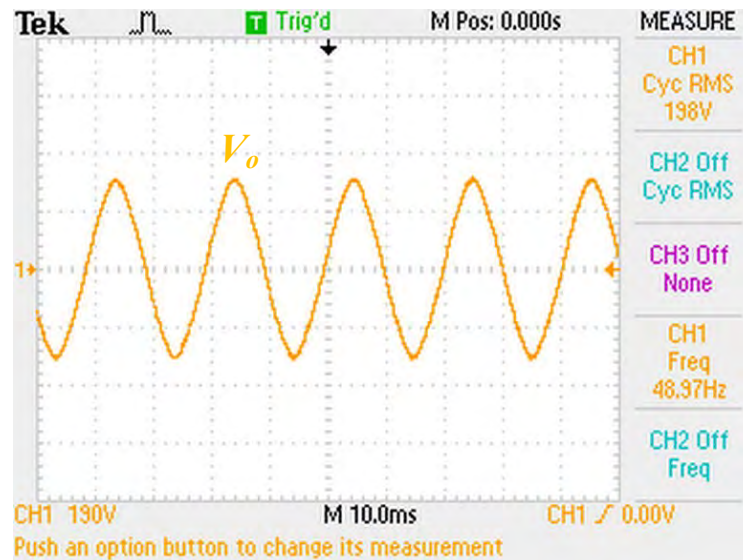


Gambar 4.31 Gelombang Tegangan Output Saat Tanpa Beban

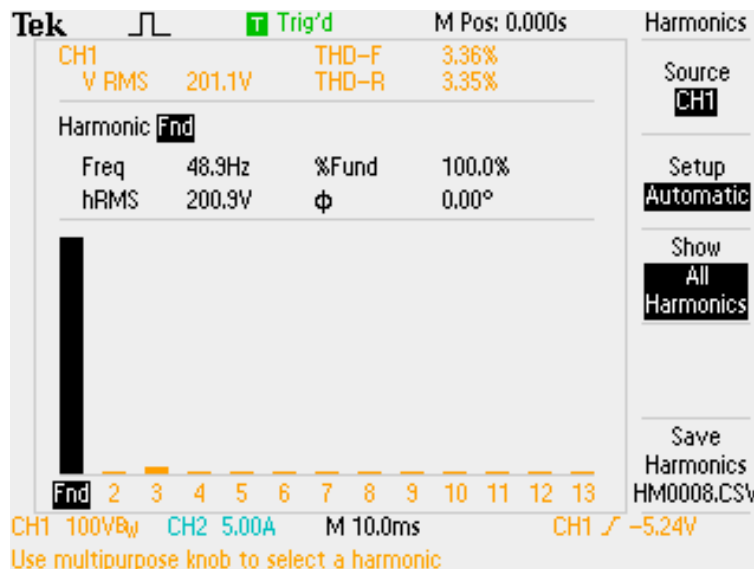


Gambar 4.32 Harmonisa Tegangan Output saat Kondisi Tanpa Beban

Hasil pengamatan harmonisa pada gelombang tegangan output SEIG yang ditunjukkan oleh Gambar 4.32 dan 4.34 terlihat bahwa terdapat harmonisa orde ke-3 pada tegangan output SEIG.



Gambar 4.33 Gelombang Tegangan Output Saat Beban Maksimum

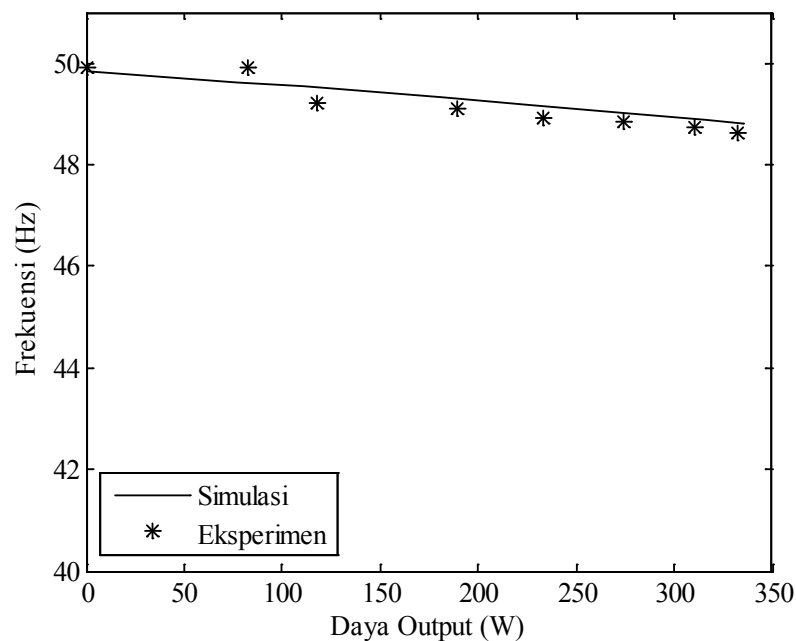


Gambar 4.34 Harmonisa Tegangan Output saat Kondisi Beban Maksimum

4.2.4 Kondisi Frekuensi Output Setelah Optimisasi

Perbandingan hasil eksperimen dan simulasi dari frekuensi output SEIG ditunjukkan oleh Gambar 4.35. Terlihat bahwa dengan kenaikan beban, maka

akan terjadi penurunan terhadap nilai frekuensi output SEIG. Sama halnya dengan kondisi sebelum optimisasi, pada kondisi setelah optimisasi nilai frekuensi pada beban maksimum masih berada pada batas yang diizinkan yaitu 48Hz .



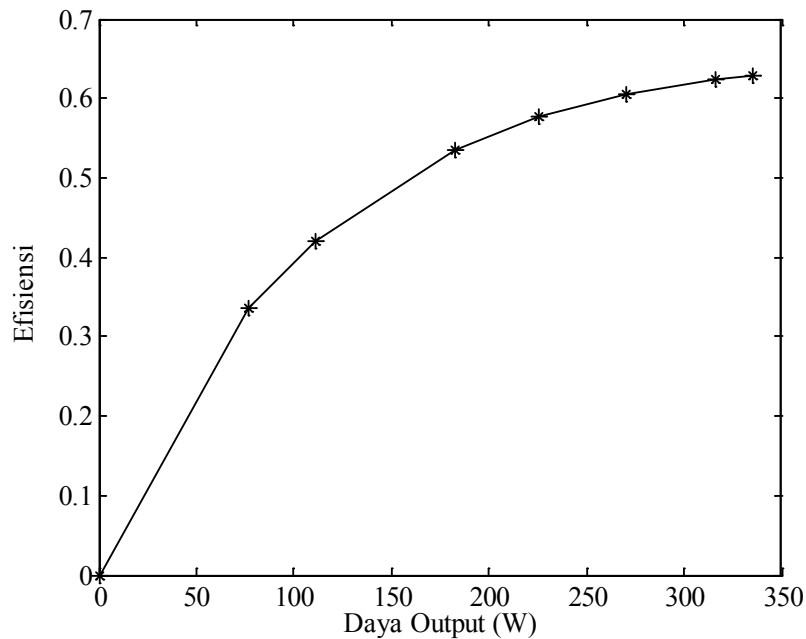
Gambar 4.35 Variasi Frekuensi Output terhadap Daya Output Setelah Optimisasi

Tabel 4.17 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen F Setelah Optimisasi

| P (W) | Eksperimen F (Hz) | Simulasi F (Hz) | error (%) |
|---------|-------------------|-----------------|-----------|
| 0 | 49,9 | 49,845 | 0,110 |
| 82,368 | 49,9 | 49,63 | 0,541 |
| 117,935 | 49,21 | 49,53 | 0,650 |
| 189,435 | 49,12 | 49,31 | 0,387 |
| 233,26 | 48,92 | 49,175 | 0,521 |
| 274,275 | 48,83 | 49,03 | 0,410 |
| 310,44 | 48,73 | 48,885 | 0,318 |
| 332,64 | 48,64 | 48,82 | 0,370 |

4.2.5 Efisiensi pada SEIG untuk Beban Satu Fasa Setelah Optimisasi

Efisiensi yang ditampilkan pada penelitian ini merupakan efisiensi SEIG dari hasil simulasi yang dilakukan. Data daya pada SEIG ketika variasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 4.18.



Gambar 4.36 Efisiensi pada SEIG dengan Perubahan Beban Setelah Optimisasi

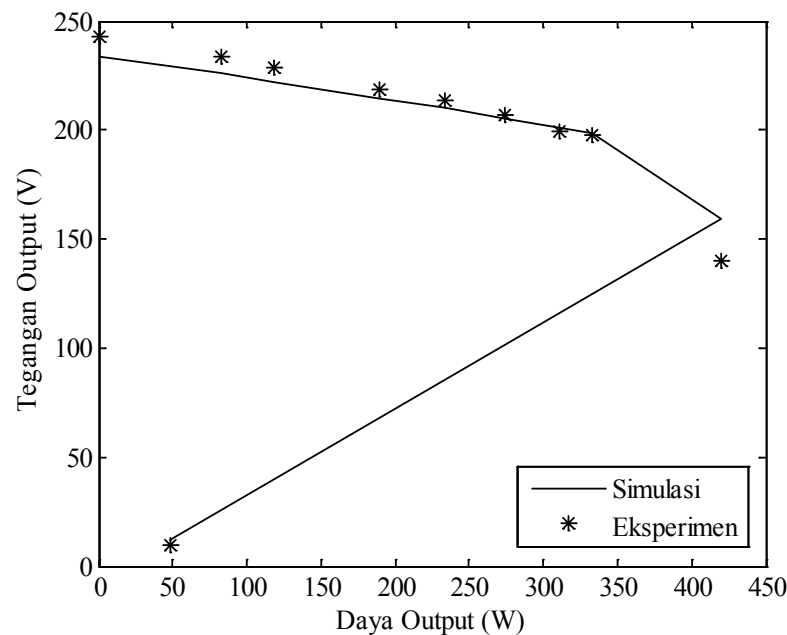
Tabel 4.18 Efisiensi SEIG untuk Beban Satu Fasa Setelah Optimisasi

| Po (W) | Pin (W) | Prot (W) | η |
|---------|----------|----------|--------|
| 0 | -56,272 | 97,380 | 0 |
| 76,784 | -132,825 | 95,720 | 0,336 |
| 111,157 | -168,491 | 95,227 | 0,421 |
| 182,213 | -245,830 | 94,907 | 0,535 |
| 225,225 | -295,541 | 95,270 | 0,576 |
| 270,501 | -350,704 | 96,150 | 0,605 |
| 315,823 | -409,378 | 97,553 | 0,623 |
| 334,858 | -435,204 | 98,291 | 0,628 |

Nilai daya input akan bernilai negatif karena SEIG akan bekerja pada kondisi frekuensi stator yang lebih kecil dibandingkan frekuensi rotor. Dari hasil perhitungan efisiensi, terlihat bahwa SEIG memiliki efisiensi yang lebih rendah pada beban kecil. Dengan demikian akan lebih efisien jika SEIG dioperasikan mendekati beban maksimumnya.

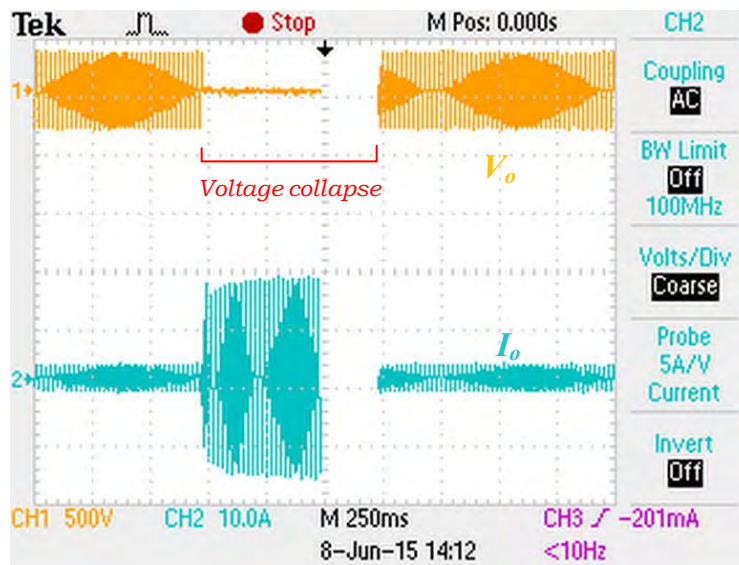
4.2.6 *Voltage Collapse* pada SEIG untuk Beban satu Fasa

Voltage collapse pada SEIG dapat disebabkan oleh penurunan kecepatan rotor secara drastis serta penambahan beban berlebih. Pada penelitian ini kecepatan rotor diasumsikan konstan, dengan demikian kondisi *voltage collapse* akan dicapai dengan penambahan beban berlebih.



Gambar 4.37 Variasi Tegangan Output Terhadap Penambahan Beban Lebih

Dari Gambar 4.37 terlihat bahwa ketika SEIG dioperasikan melebihi batas kemampuannya, akan terjadi penurunan daya output meskipun dilakukan kenaikan beban. Hal ini juga diikuti dengan penurunan tegangan output yang signifikan. Dari Gambar 4.37 terlihat bahwa tegangan output dari SEIG turun hingga 10V. Ketika beban terus ditambah, maka pada nilai pembebanan tertentu akan terjadi *voltage collapse* yaitu kondisi dimana SEIG tidak dapat membangkitkan tegangan atau tegangan output bernilai 0.



Gambar 4.38 Kondisi *Voltage Collapse* (a) Tegangan Output, (b) Arus Output

Dari eksperimen yang telah dilakukan, SEIG untuk beban satu fasa mengalami *voltage collapse* ketika dibebani melebihi 420W. Ketika dilakukan pembebanan melebihi 420W, tegangan output dari SEIG terus menurun secara drastis hingga terjadi *voltage collapse*. Gambar 4.38 (b) menunjukkan bahwa saat *voltage collapse*, terjadi kenaikan arus yang menunjukkan bahwa SEIG dibebani beban yang cukup besar. Sementara itu Gambar 4.38 (a) merupakan kondisi tegangan output, dimana terlihat saat pembebanan lebih SEIG tidak mampu membangkitkan tegangan. Hal ini ditunjukkan dengan hilangnya gelombang tegangan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini telah diajukan sebuah metode optimisasi pada kapasitor eksitasi SEIG untuk beban satu fasa dengan metode *Particle Swarm Optimization*. Simulasi dan eksperimen dilakukan guna memvalidasi metode yang diajukan. Peningkatan beban dilakukan selama simulasi serta eksperimen untuk melihat performa SEIG. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan beban akan menyebabkan penurunan terhadap tegangan dan frekuensi output dari SEIG sementara itu efisiensi dari SEIG akan meningkat seiring penambahan beban. Kondisi tak seimbang terjadi pada SEIG untuk beban satu fasa yang ditunjukkan oleh perbedaan nilai tegangan dan arus pada tiap fasa belitan stator. Pada pengamatan gelombang tegangan dan arus pada belitan stator, diketahui bahwa terdapat harmonisa pada keluaran SEIG yang ditunjukkan oleh bentuk gelombang serta spektrum harmonisa yang terukur.

Secara keseluruhan optimisasi kapasitor pada SEIG untuk beban satu fasa mampu meningkatkan kinerja dari SEIG. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa sebelum optimisasi C_p dan C_s , SEIG hanya mampu beroperasi pada beban 250W atau 33,33% dari rating mesin. Ketika melebihi daya 250W, tegangan output dari SEIG akan turun hingga 190V. Sementara itu dengan dilakukan optimisasi pada C_p dan C_s , SEIG mampu beroperasi hingga 332,64W atau 44,35% dari rating mesin. Pada kondisi ini, arus pada belitan stator dan tegangan output SEIG masih berada pada batas yang ditentukan. Selain pengukuran daya output, pengujian *voltage collapse* dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui kemampuan transfer daya dari SEIG. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketika dilakukan pembebanan yang sangat besar pada SEIG tegangan output atau tegangan ke beban dapat bernilai nol yang menunjukkan terjadinya *voltage collapse* pada SEIG.

5.2 Saran

Pada penelitian ini *constraint* pada optimisasi hanya bertujuan untuk menjaga agar arus fasa stator tidak melebihi arus maksimum di belitan dan menjaga agar tegangan output berada pada batas minimal tegangan. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menambahkan kondisi tak seimbang pada belitan stator sebagai *constraint*.

DAFTAR PUSTAKA

- C. Stephen. J. (2005) , *Electric Machinery Fundamentals*”, McGraw-Hill Companies, 2005.
- F. Tadashi, K. Yuichi, K. Satoru and M. Toshio (1999) , *Performance Analysis of a Self Regulated Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three Phase Machine* , IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999.
- N. Arista. (2012), *Analisis Kinerja Self Excited Induction Generator (SEIG) dengan Eksitasi Kapasitor Seri Paralel pada Variable Speed Turbine*, Tugas Akhir., Institut Teknologi Sepuluh Nopember , Surabaya.
- Riawan, D.C. (2009), *Steady State Analysis of a Self-Excited Induction Generator in Variable Speed Generation Systems* , Disertasi Ph.D., Australasian Universities.
- S.N. Mahato, S.P. Singh and M.P. Sharma. (2007) , *Excitation Capacitance Required for Self Excited Single Phase Induction Generator Using Three Phase Machine*, Science Direct ,Energy Conversion and Management, September 2007.
- S.N. Mahato, S.P. Sing and M.P. Sharma. (2008) , *Capacitor Required for Maximum Power of a Self-Excited Single Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine*, IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol. 23, No. , June, 2008.
- S. Miyairi. (1992), *University Course : Electro-Mechanical Energy Conversion*, Maruzen, p. 155,210.
- Standar Perusahaan Listrik Negara I . (1995), *Tegangan –Tegangan Standar* , Jakarta , Indonesia.
- S.S. Rao. (2009) , *Engineering Optimization, Theory and Practice*”, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2009.

BIOGRAFI PENULIS



Nita Indriani Pertiwi lahir di Balikpapan Kalimantan Timur pada tanggal 24 Desember 1991. Penulis adalah anak bungsu dari 2 bersaudara. Penulis banyak menghabiskan waktunya di Kota Balikpapan dan menempuh pendidikan di SDN 034 Balikpapan, SLTPN 1 Balikpapan, serta SMAN 1 Balikpapan hingga pada tahun 2009 pindah sementara ke kota Surabaya untuk melanjutkan pendidikan ke Teknik Elektro ITS Surabaya.

Lulus Sarjana pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan Magister di almamater yang sama. Semasa kuliah, penulis aktif sebagai pengurus dalam organisasi kemahasiswaan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS (HIMATEKTRO ITS) selama 2 tahun dan menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik.